

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra měřicí a řídicí techniky

Správa napájení a řízení dobíjení mobilního robota
Drive and Energy Systems for Mobile Robotic Device

Ostrava, 2010

Bc. Jan Číž

Prohlášení

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

.....
Jan Číž

Datum odevzdání diplomové práce : 7. 5. 2010

Poděkování

Chtěl bych touto cestou velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Jiřímu Kotzianovi, Ph.D. za cenné rady, konzultace a připomínky spojené s vypracováním mého úkolu.

Abstrakt

V této diplomové práci je řešena správa napájení a řízení dobíjení mobilního robota určeného pro aplikaci fotbalu robotů a pro výuku Vestavěných systémů řízení. V této práci je řešen jak vhodný výběr akumulátoru pro napájení tohoto mobilního robota, tak celkový návrh řídicího systému, který zajišťuje správu napájení a vlastní dobíjení vybraného akumulátoru. V této diplomové práci je také řešen i výběr vhodného systému pro přenos energie pro nabíjení akumulátoru. Jsou zde zhodnoceny výhody a nevýhody jak kontaktního, tak různé varianty bezkontaktního způsobu přenosu energie.

Klíčová slova

Akumulátor, primární článek, sekundární článek, bezkontaktní přenos energie, kontaktní přenos energie, fotovoltaiický jev, fotovoltaiický článek, elektromagnetická indukce, nabíjení Li-Pol akumulátoru, digitální signálový procesor.

Abstract

This thesis deals with the power supply management and the recharging control of a mobile robot dedicated for Robot soccer application and for Embedded control system learning. The selection of a suitable accumulator is solved to supply this mobile robot with power as well as the general design of the control system for managing the power supply and the actual recharging of the selected accumulator. In addition, an appropriate energy transmission system for accumulator charging is chosen. Advantages and disadvantages of the contact and non-contact transmission of electrical energy are assessed as well as the various alternatives of the non-contact transmission of energy.

Key words

Accumulator, primary cell, secondary cell, non-contact transmission of electrical energy, contact transmission of electrical energy, photovoltaic phenomenon, photovoltaic cell, electromagnetic induction, Li-Pol accumulator charging, digital signal processor.

Seznam použitých symbolů a zkratek

<i>A/D</i>	analogově/digitální
<i>ALU</i>	aritmeticko logická jednotka procesoru (Arithmetic Logic Unit)
<i>AGU</i>	jednotka pro generování adres u procesoru (Address Generation Unit)
<i>AVR</i>	označení pro rodinu 8-bitových mikrokontrolérů typu RISC firmy Atmel
<i>B</i>	magnetická indukce (T)
<i>C</i>	elektrická kapacita (F)
<i>CAN</i>	druh komunikační sběrnice (Controller Area Network)
<i>c</i>	materiálová konstanta (-)
<i>DPS</i>	deska plošných spojů
<i>DSP</i>	digitální signálový procesor (Digital Signal Processor)
<i>d</i>	měrná hmotnost ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), průměr (m)
<i>ESL</i>	ekvivalentní sériová indukčnost (Equivalent Series Inductance) (H)
<i>ESR</i>	ekvivalentní sériový odpor (Equivalent Series Resistance) (Ω)
<i>F</i>	síla (N)
<i>f</i>	frekvence (Hz)
<i>H</i>	intenzita magnetického pole ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)
<i>H_C</i>	koercitivní síla ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)
<i>H12</i>	obchodní označení feromagnetického materiálu
<i>h</i>	tloušťka (m)
<i>I</i>	elektrický proud (A)
<i>I/O</i>	vstupně/výstupní
<i>I_C</i>	celkový elektrický proud (A)
<i>JTAG/OnCE</i>	moduly umožňující ladění programu za chodu procesoru (Joint Test Action Group/On-Chip Emulation)
<i>K</i>	tvarový koeficient styku (-)
<i>L</i>	indukčnost (H)
<i>LED</i>	svítivá dioda (Light Emitting Diode)
<i>LiFePO₄</i>	lithium-železo-fosfátový akumulátor
<i>Li-Ion</i>	lithium-iontový akumulátor
<i>Li-Pol</i>	lithium-polymerový akumulátor

l	délka (m)
m	hmotnost (kg)
N	počet závitů cívky (-)
$NiCd$	nikl-kadmiový akumulátor
$NiMH$	nikl-metal-hydridový akumulátor
NTC	negativní teplotní koeficient (Negative Temperature Coefficient)
P	výkon (W)
Pb	chemická značka olova
PN	polovodičový přechod tvořený materiály s vodivostí P a N
PTC	pozitivní teplotní koeficient (Positive Temperature Coefficient)
PWM	pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
R	elektrický odpor (Ω)
RAM	druh paměti s náhodným přístupem (Random Access Memory)
R_{th}	tepelný odpor ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$)
$RISC$	označení architektury procesorů s redukovanou instrukční sadou (Reduced Instruction Set Computer)
S	plocha (m^2)
SCI	sériové komunikační rozhraní (Serial Communication Interface)
SPI	sériové periferní rozhraní (Serial Peripheral Interface)
T	perioda (s), teplota ($^{\circ}\text{C}$)
T_C	Curieho teplota ($^{\circ}\text{C}$)
t	čas (s)
U	elektrické napětí (V)
U_i	indukované elektromotorické napětí (V)
W	energie (J)
Φ	magnetický indukční tok (Wb)
Φ_C	celkový magnetický indukční tok (Wb)
α	měrný teplotní součinitel (K^{-1})
η	účinnost (%)
λ	koeficient tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
μ	absolutní permeabilita daného materiálu ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)

μ_0	permeabilita vakua ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)
ξ	rozptyl (-)
ρ	měrný elektrický odpor ($\Omega \cdot \text{m}$)

Seznam použitých cizích slov

<i>Absorpce</i>	- objemové pohlcování, vstřebávání, zeslabení
<i>Amorfní křemík</i>	- polokov bez krystalické struktury
<i>Algoritmus</i>	- postup řešení úlohy s konečným počtem přesně definovaných úkonů
<i>Autonomní proces</i>	- samosprávný proces
<i>Balancování</i>	- udržování v rovnováze
<i>Difúze</i>	- pohyb částic vyvolaný změnou fyzikální veličiny
<i>Dilatace</i>	- rozšíření, roztažení, zvětšení
<i>Elektron</i>	- elementární částice se záporným el. nábojem
<i>Flash</i>	- elektricky programovatelná paměť typu RAM
<i>Filtrace</i>	- odstranění nežádoucí složky z elektrického signálu
<i>Foton</i>	- kvantum elektromagnetického pole
<i>Fotovoltaický jev</i>	- el. jev popisující uvolnění elektronů při pohlcení elektromag. záření
<i>Fotovoltaický článek</i>	- polovodičová součástka schopná přeměňovat světlo na el. energii
<i>Indukce</i>	- el. jev, při kterém se na povrchu tělesa vytváří elektrický náboj
<i>Inicializace</i>	- nastavení počátečních hodnot
<i>Koercitivní síla</i>	- síla zabráňující změnám magnetizace materiálů
<i>Kompenzace</i>	- vyrovnání
<i>Kontinuální monitorování</i>	- nepřetržité sledování
<i>Koroze</i>	- rozrušení materiálu, zejména kovů, vlivem vnějších činitelů
<i>Mikrokontrolér</i>	- jednočipový mikropočítač integrovaný do jednoho pouzdra
<i>Monokrystalický křemík</i>	- polokov s prostorově souměrně orientovanou krystalovou mřížkou
<i>Monolitický stabilizátor</i>	- el. součástka v jednom pouzdře sloužící k vyrovnávání napětí
<i>Optočlen</i>	- el. součástka v jednom pouzdře sloužící ke galvanickému oddělení
<i>Oxidace</i>	- vytvoření tenké vrstvy oxidu na povrchu materiálu
<i>Periferie</i>	- přídatné zařízení
<i>Polykrystalický křemík</i>	- polokov skládající se z různě orientovaných krystalických bloků
<i>Pull-up rezistor</i>	- „zdvihací“ rezistor definující napěťovou úroveň
<i>Prizmatický článek</i>	- článek ve tvaru hranolu
<i>Procesor</i>	- jednočipový mikropočítač integrovaný do jednoho pouzdra
<i>Redukce</i>	- snížení, zmenšení
<i>Relaxace</i>	- uvolnění, povolení
<i>Sleep Mode</i>	- klidový režim

Obsah

1	ÚVOD	- 1 -
2	SOUČASNÝ STAV.....	- 2 -
3	CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	- 3 -
4	CHEMICKÉ ZDROJE PROUDU	- 4 -
4.1	TYPY SEKUNDÁRNÍCH ČLÁNKŮ.....	- 4 -
5	VÝBĚR VHODNÉHO AKUMULÁTORU	- 8 -
6	NÁVRH ŘEŠENÍ.....	- 9 -
6.1	BLOKOVÉ SCHÉMA SPRÁVY NABÍJENÍ.....	- 9 -
7	BEZKONTAKTNÍ ZPŮSOB PŘENOSU ENERGIE	- 11 -
7.1	ENERGETICKÝ PAPERSEK – LASER	- 11 -
7.2	FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY	- 12 -
7.3	OVĚŘENÍ MOŽNOSTI VYUŽITÍ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	- 13 -
7.4	VÝHODY A NEVÝHODY POUŽITÍ SOLÁRNÍ ENERGIE.....	- 14 -
7.5	ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE	- 14 -
7.6	OVĚŘENÍ MOŽNOSTI VYUŽITÍ ELEKTROMAGNETICKÉ INDUKCE.....	- 16 -
7.6.1	Měření na vysílací a přijímací cívce.....	- 17 -
7.6.2	Schéma zapojení vysílací části	- 19 -
7.6.3	Popis zapojení vysílací části	- 19 -
7.6.4	Výkonová ztráta.....	- 21 -
7.6.5	Schéma zapojení přijímací části	- 22 -
7.6.6	Popis zapojení přijímací části	- 22 -
7.7	VÝHODY A NEVÝHODY PŘENOSU VYSOKOFREKVENČNÍ ENERGIE	- 23 -
8	KONTAKTNÍ ZPŮSOB PŘENOSU ENERGIE	- 24 -
8.1	VODIVÉ MATERIÁLY	- 24 -
8.2	DRUHY ELEKTRICKÝCH SPOJŮ A KONTAKTŮ.....	- 24 -
8.3	CHARAKTERISTICKÉ VELIČINY STYKŮ A KONTAKTŮ	- 24 -
8.3.1	Stykový odpor.....	- 25 -
8.3.2	Ztráty proudovodičů a kontaktů.....	- 27 -
8.3.3	Oteplení kontaktů a proudovodičů.....	- 27 -

8.3.4	Materiály proudovodičů a spojů	- 28 -
8.4	NÁVRH KONTAKTNÍHO ZPŮSOBU PŘENOSU ENERGIE	- 28 -
8.5	VÝHODY A NEVÝHODY KONTAKTNÍHO ZPŮSOBU PŘENOSU ENERGIE	- 29 -
9	NÁVRH NABÍJECÍHO OBVODU	- 30 -
9.1	NABÍJECÍ OBVOD BQ2057W	- 30 -
9.1.1	Pouzdro obvodu BQ2057W	- 30 -
9.1.2	Blokové schéma obvodu BQ2057W	- 31 -
9.1.3	Popis jednotlivých vývodů	- 31 -
9.1.4	Elektrické charakteristiky	- 32 -
9.1.5	Popis nabíjení pomocí obvodu BQ2057W	- 33 -
9.1.6	Hlídání teploty akumulátoru	- 33 -
9.1.7	Nabíjecí charakteristika	- 34 -
9.1.8	Výpočet nabíjecího proudu	- 34 -
9.1.9	Schéma zapojení nabíjecího obvodu	- 35 -
9.1.10	Popis zapojení nabíjecího obvodu	- 35 -
9.1.11	Výkonová ztráta	- 36 -
9.2	TESTOVÁNÍ NABÍJECÍHO OBVODU BQ2057W	- 37 -
9.3	VÝHODY A NEVÝHODY NABÍJECÍHO OBVODU BQ2057W	- 38 -
9.4	NABÍJECÍ OBVOD ŘÍZENÝ DSP56F805	- 39 -
9.4.1	Schéma zapojení	- 39 -
9.4.2	Popis zapojení	- 40 -
9.4.3	Návrh akumulačního měniče se sestupným napětím	- 41 -
9.4.4	Popis procesoru DSP56F805	- 46 -
9.4.5	Vývojový diagram algoritmu nabíjení	- 48 -
9.4.6	Popis algoritmu nabíjení pro DSP56F805	- 49 -
9.5	TESTOVÁNÍ NABÍJECÍHO OBVODU ŘÍZENÉHO DSP56F805	- 50 -
9.6	VÝHODY A NEVÝHODY NABÍJECÍHO OBVODU ŘÍZENÉHO DSP56F805	- 51 -
10	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ	- 52 -
11	ZÁVĚR	- 54 -

Seznam obrázků

Obr. 1	Současný stav připojení NiMH akumulátoru k mobilnímu robotovi.....	- 2 -
Obr. 2	Fotbalový robot.....	- 3 -
Obr. 3	Olověný akumulátor 6 V/4,5 Ah.....	- 4 -
Obr. 4	NiCd článěk 1,2 V/2000 mAh (vlevo) a NiCd akupack 7,2 V/1500 mAh (vpravo).....	- 5 -
Obr. 5	NiMH článěk 1,2 V/360 mAh (vlevo) a NiMH akupack 8,4 V/300 mAh (vpravo)	- 5 -
Obr. 6	LiFePO ₄ článěk 3 V (vlevo) a prizmatický článěk 3,2 V/10 Ah (vpravo)	- 6 -
Obr. 7	Li-Pol článěk 3,7 V/1000 mAh (vlevo) a Li-Pol akupack 7,4 V/1000 mAh (vpravo).....	- 7 -
Obr. 8	Blokové schéma správy nabíjení s využitím bezkontaktního přenosu energie	- 9 -
Obr. 9	Blokové schéma správy nabíjení s využitím kontaktního přenosu energie.....	- 10 -
Obr. 10	Letadlo napájené pomocí laserového paprsku, [7].....	- 12 -
Obr. 11	Fotovoltaický článěk, [9]	- 13 -
Obr. 12	Použitý fotovoltaický článěk 3 V/430 mA.....	- 13 -
Obr. 13	Zatěžovací charakteristika použitých fotovoltaických článků	- 14 -
Obr. 14	Hrníčkové jádro RM36X22	- 16 -
Obr. 15	Prototyp vysílací cívky navinuté na hrníčkovém jádře	- 17 -
Obr. 16	Schéma zapojení obvodu pro přenos vysokofrekvenční energie	- 17 -
Obr. 17	Zatěžovací charakteristika pro přenos vysokofrekvenční energie	- 18 -
Obr. 18	Schéma zapojení vysílací části přenosu vysokofrekvenční energie.....	- 19 -
Obr. 19	Vnitřní struktura obvodu HCPL3101, [15]	- 20 -
Obr. 20	Schéma zapojení přijímací části přenosu vysokofrekvenční energie.....	- 22 -
Obr. 21	Stykový odpor mezi kontakty, [20].....	- 25 -
Obr. 22	Možné řešení využití kontaktního způsobu přenosu energie	- 28 -
Obr. 23	Rozložení vývodů obvodu BQ2057W, [21].....	- 30 -
Obr. 24	Blokové schéma obvodu BQ2057W, [21]	- 31 -
Obr. 25	Nabíjecí charakteristika obvodu BQ2057W, [21].....	- 34 -
Obr. 26	Schéma zapojení nabíjecího obvodu BQ2057W.....	- 35 -
Obr. 27	Schéma zapojení nabíjecího obvodu řízeného DSP56F805.....	- 39 -
Obr. 28	Akumulační měnič se sestupným napětím, [24]	- 41 -
Obr. 29	Průběhy napětí a proudů u akumulačního měniče se sestupným napětím, [24].....	- 41 -
Obr. 30	Závislost výstupního napětí U_0 na hodnotě tlumivky L	- 42 -
Obr. 31	Blokové schéma DSP56F805, [30]	- 46 -
Obr. 32	Blokové schéma jádra procesoru DSP56F805, [30]	- 47 -
Obr. 33	Vývojový diagram algoritmu nabíjení pro DSP56F805	- 48 -

Seznam tabulek

Tab. 1	Účinnost fotovoltaických článků, [9].....	- 13 -
Tab. 2	Technická specifikace použitého feromagnetického materiálu H12, [13].....	- 16 -
Tab. 3	Parametry vysílací a přijímací cívky.....	- 17 -
Tab. 4	Naměřené hodnoty při nabíjení akumulátoru nabíjecím obvodem BQ2057W.....	- 37 -
Tab. 5	Naměřené hodnoty při nabíjení akumulátoru nabíjecím obvodem řízeným DSP56F805.....	- 50 -

1 Úvod

V této diplomové práci bude řešena správa napájení a řízení dobíjení mobilního robota, který se účastní zápasu ve fotbale robotů. Problematikou této diplomové práce bude hlavně výběr vhodného akumulátoru pro napájení tohoto mobilního robota (viz. kapitoly 4 a 5) a dále návrh systému, který bude zajišťovat správu napájení a vlastní dobíjení vybraného akumulátoru (viz. kapitoly 6 a 9).

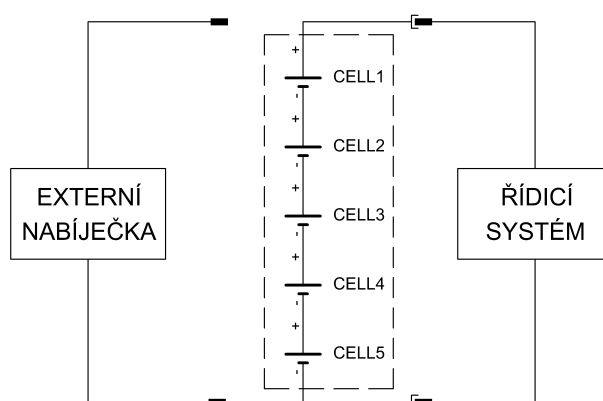
Dalším úkolem bude teoreticky zhodnotit možné způsoby přenosu energie, zda kontaktní či bezkontaktní a na základě těchto znalostí pak určit vhodný systém pro přenos energie pro nabíjení daného akumulátoru. V této diplomové práci tedy budou zhodnoceny jak teoreticky, tak prakticky různé způsoby bezkontaktního přenosu energie, jmenovitě např. přenos energie pomocí energetického laserového paprsku (viz. kapitola 7.1), přenos energie pomocí solárních článků (viz. kapitoly 7.2, 7.3, 7.4) či přenos energie pomocí elektromagnetické indukce (viz. kapitoly 7.5, 7.6, 7.7). Na základě provedených měření pak budou vyřčeny výhody a nevýhody výše jmenovaných způsobů přenosu energie a na základě těchto závěrů pak bude určen způsob přenosu energie vhodný pro nabíjení vybraného akumulátoru.

Dále se v této diplomové práci bude řešit návrh vlastního nabíjecího obvodu, jehož hlavní funkcí bude realizování nabíjecího algoritmu včetně veškeré správy nabíjení vybraného akumulátoru. Jedná se především o nabíjení malým proudem při nabíjení hluboce vybitých akumulátorů, automatické ukončení nabíjení, automatické znovuspuštění nabíjení při poklesu napětí či hlídání teploty akumulátoru při nabíjení.

Jako řídicí část nabíjecího obvodu zde bude odzkoušen jak komerčně dodávaný obvod, který realizuje nabíjecí algoritmus pro vybraný akumulátor (viz. kapitoly 9.1, 9.2, 9.3), tak vlastní digitální signálový procesor, který mimo jiné zajišťuje řízení celého fotbalového robota, a pro který bude napsán vlastní nabíjecí algoritmus, který bude možné později implementovat do řídicího algoritmu fotbalového robota (viz. kapitoly 9.4, 9.5, 9.6). Stávající digitální signálový procesor tak bude doplněn jen o nejnútnejší obvodové součástky, které budou zajišťovat nabíjení daného akumulátoru.

2 Současný stav

Jak už bylo řečeno, tato diplomová práce se mimo jiné bude zabývat i výběrem vhodného akumulátoru pro napájení fotbalového robota. Dosavadní stav byl následující: fotbalový robot byl napájený z akumulátoru tvořeného z 5-ti NiMH článků zapojených do série s napětím 1,2 V a kapacitou 880 mAh na článek. Obvodová část fotbalového robota nebyla doplněna o žádný obvod zajišťující správu nabíjení a tudíž při vybití tohoto akumulátoru bylo vždy nutné akumulátor odpojit od mobilního robota a připojit na externí nabíječku.



Obr. 1 Současný stav připojení NiMH akumulátoru k mobilnímu robotovi

3 Cíl diplomové práce

Do budoucna je připravována pro studenty laboratorní úloha, při níž si studenti mohou odzkoušet vzdálené řízení chování mobilního robota. V tomto případě budou roboti ovládáni vzdáleně bez možnosti ručního zásahu pro případné dobití akumulátoru mobilního robota. V tomto případě to znamená, že je nutné vytvořit určité podmínky pro to, aby mohlo být realizováno samočinné dobíjení akumulátoru bez jakéhokoli zásahu obsluhy. Cílem této diplomové práce tedy bude vybrat vhodný akumulátor pro napájení fotbalového robota a nahradit tak původní NiMH akumulátor. Poté bude nutné určit vhodný systém pro přenos energie pro dobíjení akumulátoru, tedy zhodnotit výhody a nevýhody použití kontaktního, či bezkontaktního způsobu přenosu energie. Následně pak bude nutné navrhnout a prakticky realizovat nabíjecí obvod, který bude zajišťovat autonomní správu nabíjení vybraného akumulátoru.



Obr. 2 Fotbalový robot

4 Chemické zdroje proudu

V následujících kapitolách bude podrobně rozebrána problematika dostupných chemických zdrojů proudu, které by mohli být použitelné pro napájení mobilního robota. Chemické zdroje proudu lze podle principu rozdělit do dvou základních skupin. První skupinu tvoří primární články a druhou skupinu představují akumulátory neboli sekundární články. V této práci budou podrobněji popsány jen sekundární články, neboť ty lze opětovně nabíjet a jsou tak vhodnější pro napájení mobilního robota.

4.1 Typy sekundárních článků

Typy akumulátorů rozlišujeme podle jejich chemického složení. Nejvíce používané akumulátory, hlavně v modelářství, jsou následující: Pb, NiCd, NiMH, Li-Ion, Li-FePO₄, Li-Pol.

Pb – olověný (gelový) – V modelářské praxi se používají tzv. bezúdržbové hermetické gelové akumulátory. Vzhledem ke své hmotnosti a váze se hodí spíše do větších modelů. Používají se např. k napájení žhavení motorů, palivových čerpadel atp.

Mohou pracovat ve všech polohách (nehrozí tedy vytečení elektrolytu). Tyto akumulátory se skladují zásadně v nabitém stavu (jinak dochází ke ztrátě kapacity nebo zničení). Snadno se poškodí při hlubokém vybíjení nebo přebíjení. Akumulátor není nutné před začátkem nabíjecího cyklu vybíjet. Jmenovité napětí na článek je 2 V.



Obr. 3 Olověný akumulátor 6 V/4,5 Ah

Výhody: vysoká kapacita, dlouhá životnost, nízké samovybíjení.

Nevýhody: vysoká hmotnost, větší rozměry, neschopnost dodávat vysoké proudy, ekologicky nešetrné (olovo), pomalé nabíjení (nabíjecí proud 0,1 C).

NiCd – nikl-kadmiový – Mají poměrně široké uplatnění. Můžeme se s ním setkat hlavně tam, kde jsou potřebné velké proudové odběry, řádově desítky ampér. Mají menší vnitřní odpor než NiMH akumulátory, větší vybíjecí a nabíjecí proudy než NiMH, vyšší celkovou odolnost a menší samovybíjení. Tyto akumulátory se skladují ve vybitém stavu. Škodí jim nadměrné přebíjení a před začátkem nabíjecího cyklu se musejí vybit, jinak klesá jejich kapacita a životnost (trpí tzv. paměťovým efektem). Jmenovité napětí na článek je 1,2 V.



Obr. 4 NiCd článek 1,2 V/2000 mAh (vlevo) a NiCd akupack 7,2 V/1500 mAh (vpravo)

Výhody: schopnost dodávat vysoké proudy, vysoký počet nabíjecích cyklů (až 1000), provozní podmínky (snáší teploty až do -40°C), možnost rychlého nabíjení, pořizovací cena.

Nevýhody: vyšší hmotnost, menší kapacita, ekologicky velmi závadné (jedovaté kadmium).

NiMH – nikl-metal-hydridový – Při stejných rozměrech jako NiCd dosahují vyšší kapacity a mají o něco nižší hmotnost. Nehodí se ale tam, kde jsou vysoké proudové odběry. Skladují se zásadně v nabitém stavu. Vyznačují se velkým samovybíjením než NiCd. Není třeba před začátkem každého nabíjení akumulátor vybit, ale vybití je dobré často provádět, jinak klesá životnost a kapacita akumulátoru (tzv. paměťový efekt). Jmenovité napětí na článek je 1,2 V.



Obr. 5 NiMH článek 1,2 V/360 mAh (vlevo) a NiMH akupack 8,4 V/300 mAh (vpravo)

Výhody: vyšší kapacita a nižší hmotnost oproti NiCd, rychlé nabíjení, ekologicky šetrnější.

Nevýhody: rychlé samovybíjení, neschopnost dodávat vysoké proudy, nižší počet nabíjecích cyklů (cca 500), provozní podmínky.

Li-Ion – lithium-iontový – Tyto baterie mají ve srovnání s bateriemi NiMH 3x větší kapacitu, ale musíme také počítat s tím, že jsou značně dražší. Skladují se v nabitém stavu. Velmi snadno se poškodí při nadměrném vybití nebo přebíjení, proto je nutná ochranná elektronika. Tyto akumulátory netrpí paměťovým efektem, tudíž je možné je nabíjet v jakémkoliv stavu vybití. Vyžaduje se velmi přesné nabíjecí napětí 4,2 V a omezení nabíjecího proudu zpravidla na 1 C.

Výhody: netrpí paměťovým efektem, vysoká kapacita, velmi nízká hmotnost, velmi malé samovybíjení, vysoký počet nabíjecích cyklů (600 až 1000).

Nevýhody: neschopnost dodávat vysoké proudy, pořizovací cena.

LiFePO₄ – lithium-železo-fosfátový – Novou generací lithium iontových nabíjecích baterií jsou akumulátory postavené na lithium železo fosfátu (LiFePO₄). Toto označení získaly díky katodě vyrobené z tohoto materiálu. Anoda je jako u ostatních Li-Ion baterií vyrobena z uhlíku. Mezi jejich hlavní přednosti oproti klasickým Li-Ion akumulátorům patří především schopnost dodávat vyšší proud a to, že při extrémních podmínkách nevybuchují. Nominální napětí LiFePO₄ článků se pohybuje zhruba okolo 3,2 V (mezi 3,0 až 3,3 V).

Minimální napětí, na které je možné tento článek vybit, je obvykle 2,8 V. Některé akumulátory jsou schopny dodat pracovní proud impulsně až 10 C a životnost je udávána více jak 2000 cyklů. Samovybíjecí efekt u těchto akumulátorů prakticky neexistuje a je možné je nabíjet v jakémkoliv stavu vybití (netrpí tzv. paměťovým efektem). Mimo jiné lze tyto akumulátory používat v rozmezí teplot od -20 °C až do 70 °C.



Obr. 6 LiFePO₄ článek 3 V (vlevo) a prizmatický článek 3,2 V/10 Ah (vpravo)

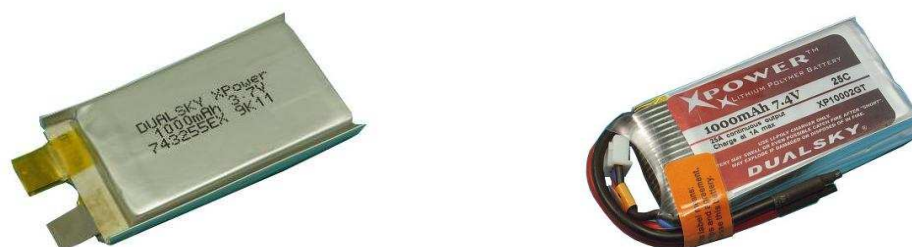
Výhody: netrpí paměťovým efektem, prakticky žádné samovybíjení, schopnost dodávat vysoké proudy, bezpečné, stabilní, odolné proti nešetrnému zacházení (k zničení dochází až při extrémním přehřátí – 800 °C a výše), vysoký počet nabíjecích cyklů (až 2000), provozní podmínky.

Nevýhody: nižší napětí než u Li-Pol a Li-Ion článků, nižší energetická hustota v poměru s velikostí a hmotností než u Li-Ion, možnost předčasného selhání při „hlubokém cyklování“ (dlouhodobé vybíjení pod úroveň 33 %), někteří výrobci doporučují po 20-ti nabíjecích cyklech provést pauzu.

Li-Pol – lithium-polymerový – Výhodou těchto článků je jejich prizmatický tvar (hranol), malá hmotnost, vysoká kapacita, velká výkonnost a velmi malé samovybíjení. Díky svým vlastnostem se stále více prosazují, jsou neustále vyvíjeny přičemž je zvyšována jejich kapacita a výkonnost.

Nevýhodou těchto akumulátorů je však nutnost používání elektronické ochrany jednotlivých článků při nabíjení a vybíjení. Při jejich nabíjení a vybíjení nesmí být překročeny výrobcem stanovené hodnoty, v opačném případě dojde k poškození článků. Toto poškození je ve většině případů nevratné a proto je při nabíjení Li-Pol akumulátorů třeba používat pouze nabíječky, které jsou pro tyto články určené. Jednou z nevýhod těchto akumulátorů je také jejich křehkost a „zranitelnost“. Obal článku je tvořen kovovou fólií, která je minimálně mechanicky odolná a při jejím poškození hrozí nebezpečí požáru a poškození zdraví.

Napětí plně nabitého článku se pohybuje v rozmezí 4,1 až 4,3 V. Napětí vybitého článku se pohybuje v intervalu 2,5 až 2,8 V (opět udává výrobce). Nevýhodou těchto článků je také velikost nabíjecího proudu, který nesmí přesáhnout hodnotu 1 C (u vybraných akumulátorů s malým vnitřním odporem je možné nabíjet proudem až 3 C).



Obr. 7 Li-Pol článek 3,7 V/1000 mAh (vlevo) a Li-Pol akupack 7,4 V/1000 mAh (vpravo)

- Výhody: netrpí paměťovým efektem, velmi malé samovybití – cca 1 % za měsíc, malá hmotnost, velká energetická hustota, vysoký počet nabíjecích cyklů (600 až 1000).
- Nevýhody: nároky na přesné nabíjení – při nedodržení hodnot nabíjení a vybíjení hrozí zničení článku, problematická funkce za nízkých teplot, křehkost a zranitelnost jednotlivých článků.

[1], [2], [3], [4]

5 Výběr vhodného akumulátoru

Na základě teoretických znalostí uvedených v kapitole 4 bude v následující kapitole popsán výběr vhodného akumulátoru pro napájení mobilního robota. Pohon robota je tvořen dvěma stejnosměrnými motory, které při rozjezdu každý z nich odebírají proud špičkově až 3 A. Proto bude nutné vybrat akumulátor, který bude schopen dodávat špičkově dostatečný proud, aniž by došlo k jeho poškození. Skutečný odběr obou motorů po rozjezdu se pohybuje přibližně okolo 500 mA a řídicí elektronika celého mobilního robota odebírá proud přibližně 200 mA.

Pro tuto aplikaci byl tedy vybrán na základě svých výhod uvedených v kapitole 4.1 akumulátor typu Li-Pol. Výhoda u tohoto akumulátoru je hlavně jeho odolnost vůči paměťovému efektu, což umožňuje akumulátor nabíjet v jakémkoliv stavu vybití. Další výhodou je zde také samozřejmě jeho nízká hmotnost při relativně velké energetické hustotě. Tato skutečnost umožňuje vybrat akumulátor s poměrně velkou kapacitou při relativně malých rozměrech.

Důležitým parametrem pro výběr akumulátoru byly také hlavně rozměry, které nesměly přesáhnout hodnoty 53x28x24 mm (mobilní robot byl původně napájený NiMH články, pro něž byl vymezen právě tento prostor). Značnou výhodou u těchto akumulátorů Li-Pol je to, že se nevyrábějí ve standardizovaných rozměrech, a proto tedy bylo možné nalézt akumulátor s požadovanými rozměry a s požadovanou kapacitou. Vybraný akumulátor se skládá ze dvou do série zapojených článků s jmenovitým napětím 3,7 V a kapacitou 800 mAh. Tedy výsledné jmenovité napětí celého akumulátoru je 7,4 V. Při plně nabitém akumulátoru dosahuje napětí 8,4 V a akumulátor je schopen dodávat špičkově proud až 20 C, tedy přibližně až 16 A.

Výběr tohoto Li-Pol akumulátoru však vyžaduje použití specializovaných obvodů, které zajistí jeho korektní nabití. Navíc v případě, že je akumulátor vytvořen z více článků, musí být zajištěno, aby všechny články akumulátoru byly nabity na shodné napětí. Jelikož může být akumulátor složen z článků, které nemusejí mít totožné vlastnosti a parametry, může se stát, že se jeden z článků bude nabíjet rychleji než ty ostatní. Napětí dílčích článků se však nesmí lišit o více jak 30 mV. To znamená, že při nabíjení tohoto akumulátoru musí být navíc realizováno jakési balancování nabíjecího proudu, které zajistí to, že se jednotlivé články nabíjí na stejné napětí.

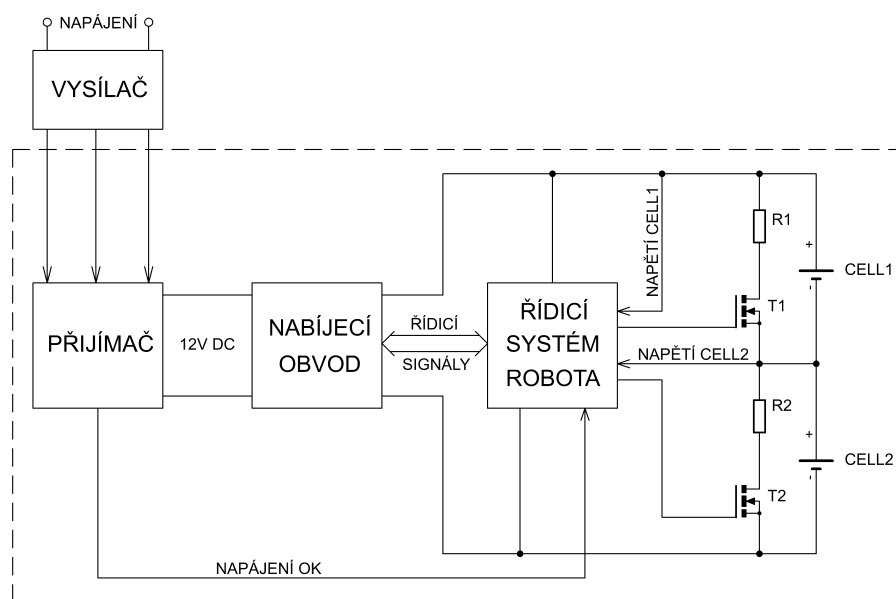
6 Návrh řešení

Pro napájení mobilního robota byl tedy vybrán Li-Pol akumulátor složený ze dvou do série zapojených článků s jmenovitým napětím 3,7 V a kapacitou 800 mAh na článek. Vystává zde otázka, zda systém, který bude zajišťovat autonomní správu nabíjení tohoto akumulátoru, umístit přímo na mobilního robota nebo mimo něj. Jelikož bude u nabíjení vybraného Li-Pol akumulátoru nutné měřit jak velikost nabíjecího proudu, tak jednotlivá napětí na článcích, je ale jisté, že nabíjecí obvod musí být umístěný přímo na mobilním robotovi.

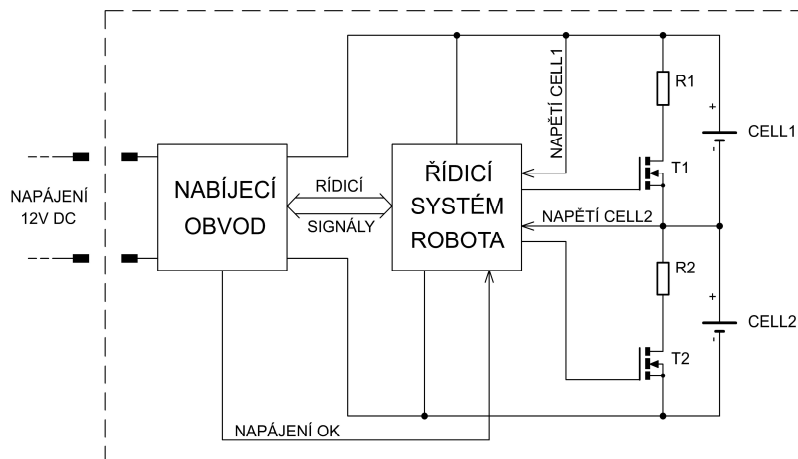
Pro dobíjení vybraného akumulátoru je nutné zajistit přívod pro napájení výše zmíněného nabíjecího obvodu a přivést tak energii potřebnou pro nabíjení akumulátoru. Opět zde vystává otázka, zda využít bezkontaktního či kontaktního způsobu přenosu energie. Tato otázka bude zodpovězena pro prostudování následujících kapitol (viz. kapitoly 7 a 8), ve kterých budou řešeny výhody a nevýhody jak kontaktního, tak různé varianty bezkontaktního způsobu přenosu energie.

6.1 Blokové schéma správy nabíjení

Na obr. 8 a obr. 9 je zobrazeno navržené blokové schéma řídicí aplikace s využitím kontaktního či bezkontaktního způsobu přenosu energie. Celá řídicí aplikace může být rozdělena na tři základní části. V případě využití bezkontaktního způsobu přenosu energie je první část tvořena obvodem, který realizuje přenos energie pro nabíjení akumulátoru. Tato část je tvořena vysílačem, který přeměňuje elektrickou energii na jinou energii vhodnou pro přenos a vysílá ji směrem k přijímači. Přijímač tuto energii přijme, převede ji zpátky na elektrickou energii a dále ji upraví tak, aby bylo možné s ní napájet nabíjecí obvod a nabíjet tak akumulátor. V případě využití kontaktního způsobu přenosu energie je nabíjecí obvod napájen prostřednictvím dvou kontaktů připevněných přímo na robotovi.



Obr. 8 Blokové schéma správy nabíjení s využitím bezkontaktního přenosu energie



Obr. 9 Blokové schéma správy nabíjení s využitím kontaktního přenosu energie

Druhá část řídicí aplikace je tvořena vlastním nabíjecím obvodem, který realizuje proces nabíjení vybraného akumulátoru. V tomto případě zde bude odzkoušen jak komerčně dodávaný nabíjecí obvod, který realizuje nabíjecí algoritmus, tak zde bude také navržen spínaný zdroj, který bude dodávat potřebné nabíjecí napětí a proud do akumulátoru a bude řízený digitálním signálovým procesorem, který realizuje mimo jiné i řízení celého mobilního robota. Bude zde tedy navržen vlastní nabíjecí algoritmus, který bude realizovat digitální signálový procesor, a ten bude doplněn jen o nejn nutnější obvodové součástky zajišťující nabíjení akumulátoru.

Poslední nejdůležitější částí je řídicí systém, který realizuje vlastní řízení fotbalového robota. Jedná se o systém, který je už doposud navržený, nicméně je nutné jej doplnit o další obvodové zapojení jako je právě nabíjecí obvod, který zde bude zajišťovat např. funkci balancování nabíjecího proudu, měření napětí na jednotlivých člancích či regulaci nabíjecího napětí a nabíjecího proudu.

Jeho důležitou funkcí tedy bude kontinuální monitorování napětí pro napájení nabíjecího obvodu a pokud bude k dispozici potřebné napětí, resp. proud, zajistí spuštění nabíjecího obvodu a spuštění funkce balancování nabíjecího proudu, a bude tak provádět správu nabíjení vybraného akumulátoru.

7 Bezkontaktní způsob přenosu energie

V následujících kapitolách bude podrobně rozebrána problematika popisující možné způsoby přenosu elektrické energie. Základní rozdělení způsobů přenosu energie je na bezkontaktní a kontaktní. Bezkontaktní přenos energie je každý přenos, u kterého není podmínkou dotyk vysílacího a přijímacího zařízení, z čehož je patrné, že prostředník nesmí tvořit součást ani vysílacího ani přijímacího zařízení. Mezi základní bezkontaktní způsoby přenosu energie patří především přenos energie pomocí energetického paprsku, přenos vysokofrekvenční energie pomocí elektromagnetické indukce, či přenos energie pomocí fotovoltaiických článků, atp.

7.1 Energetický paprsek – laser

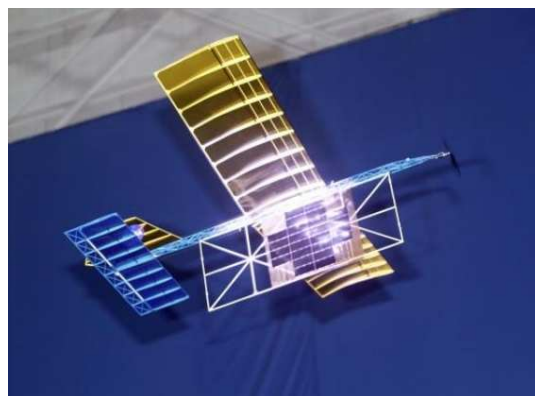
K bezkontaktnímu přenosu elektrické energie může být také použit i energetický světelný paprsek generovaný laserem. Laser tvoří elektromagnetické vlny o nízké vlnové délce obvykle z oblasti viditelného světla. Vzhledem k principu fungování laseru se energie přenáší ve velmi úzkém paprsku, což je na jednu stranu z hlediska rozptylu energie dobře, ale na druhou stranu to vyžaduje přímou viditelnost mezi zdrojem a příjemcem, což je pro předpokládané použití zcela nevhodné. [5]

Princip přenosu energie pomocí energetického paprsku spočívá v přeměně elektrické energie na elektromagnetické záření o nízké vlnové délce obvykle z oblasti viditelného světla v podobě laserového paprsku, který se nasměruje na solární přijímač, jehož úkolem je převést tuto energii zpět na energii elektrickou. Tento mechanismus je obecně známý jako „powerbeaming“ (vyzářená energie dopadající na přijímač je zpětně převedena na energii elektrickou). Níže jsou vyjmenovány základní charakteristiky přenosu energie pomocí energetického laserového paprsku:

- Kompaktní velikost pevných laserů a fotovoltaiických polovodičových prvků umožňují snadnou integraci do produktů s malými rozměry.
- Schopnost pracovat s nulovým rádio-frekvenčním rušením stávajících komunikačních zařízení, jako jsou mobilní telefony a Wi-Fi.
- Neefektivní převod elektrické energie na elektromagnetické záření v podobě laserového paprsku (zlepšení účinnosti se může docílit použitím kvantového kaskádního laseru).
- Neefektivní převod elektromagnetické záření zpět na elektrickou energii.
- Ztráty způsobené atmosférickou absorpcí.
- Nutná přímá viditelnost mezi zdrojem elektromagnetické záření a přijímačem. [6]

V současné době bylo provedeno spoustu pokusů o napájení energeticky nenáročných aplikací pomocí energetického laserového paprsku, z nichž asi nejznámější je právě pokus demonstrující let bezpilotového malého letadla napájeného pomocí laserového paprsku (viz. obr. 10) provedený v prostorách letového střediska NASA v roce 2003. Letadlo vážící 312 g bylo osazeno vlastním fotovoltaiickým panelem firmy Spectrolab představující tenký film fotovoltaiických článků GaInP2.

Jelikož tyto články nedokázaly samostatně pojmout vysokou energetickou hustotu laserového paprsku, musely být rozprostřeny do jednoho pole tvořeného 24 články, které visely z trupu letadla.

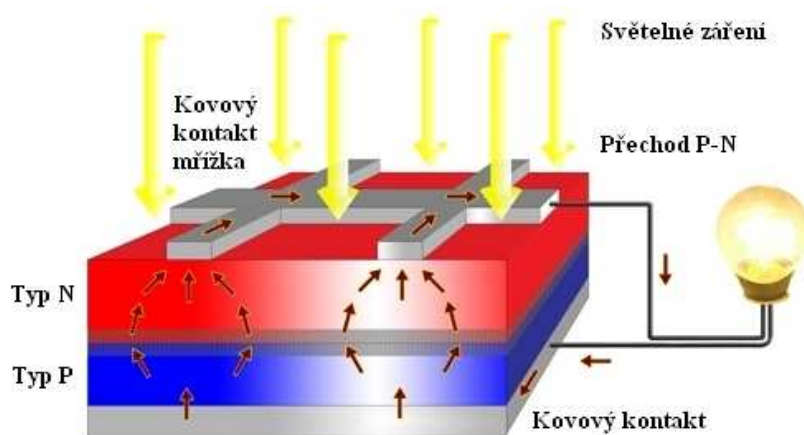


Obr. 10 Letadlo napájené pomocí laserového paprsku, [7]

Demonstrace letu tohoto letadla byla provedena uvnitř velké budovy, kde operátor ručně sledoval dráhu letu tohoto letadla pomocí nastavitelného 1,5 kW laseru při vlnové délce 940 nm s přibližnou vzdáleností 15 m. Při intenzitě laserového paprsku 500 W byl fotovoltaický přijímač schopen poskytnout výkon přibližně 7 W pro napájení motoru, což bylo dostačující pro udržení letadla ve vzduchu. Tento experiment tak prokázal účinnost 17,7 % použitých fotovoltaických článků. [7]

7.2 Fotovoltaické články

Fotovoltaické články jsou polovodičové prvky, které přeměňují světelnou energii v energii elektrickou. Fotoelektrický efekt vysvětluje vznik volných elektrických nosičů dopadem elektromagnetického záření. Aby se z krystalové mřížky křemíku začaly uvolňovat elektrony, musí mít fotony záření energii aspoň 1,12 eV. Tato energie fotonu je závislá na vlnové délce záření. Mezní vlnová délka, při níž nastává fotovoltaický jev, je přibližně 1105 nm, čemuž odpovídá infračervené záření. Fotony záření s kratší vlnovou délkou (např. fotony viditelného světla) mají také dostatek energie a elektrony mohou z mřížky uvolnit. Záření s větší vlnovou délkou (např. mikrovlny) fotovoltaický jev však již nevyvolají. Základem fotovoltaického článku je plátek krystalického křemíku typu P, jehož spodní strana je potištěna vodivou stříbrnou mřížkou. Na horní ploše se difúzí fosforu vytvoří asi 500 nm silná vrstvička polovodiče typu N. Na této vrstvě jsou navíc sítotiskem vytvořeny úzké vodivé kontakty. Mezi oběma vrstvami tak vznikne přechod PN, zabraňující volnému přechodu elektronů z místa jejich nadbytku do místa jejich nedostatku. Dopadá-li světlo na povrch fotovoltaického článku, předávají fotony svou energii atomům v krystalové mřížce křemíku a uvolňují z ní elektrony. Přechod PN způsobí, že elektrony uvolněné v horní vrstvě polovodiče N nemohou přecházet do vrstvy P a hromadí se ve vrstvě N. Elektrony uvolněné světlem ve vrstvě P naopak mohou přes přechod PN přecházet do vrstvy N a počet elektronů se v ní dále zvyšuje. Nahromaděním volných elektronů tak vznikne mezi horní a spodní vrstvou elektrické napětí o velikosti kolem 0,6 V. Připojí-li se mezi horní a spodní kontakt fotovoltaického článku nějakou zátěž, vytvoří se uzavřený elektrický obvod. Elektrony nahromaděné v horní vrstvě procházejí přes zátěž ke spodnímu kontaktu a obvodem začne procházet elektrický proud.



Obr. 11 Fotovoltaický článek, [9]

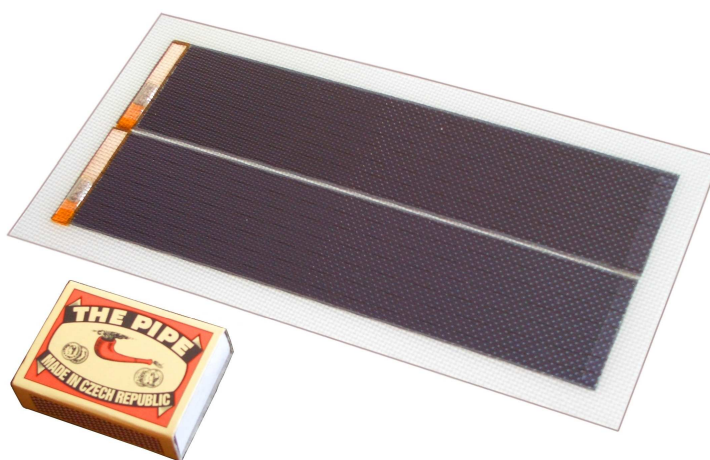
Dosažené napětí na jednom článku se pohybuje v rozmezí od 0,6 do 0,7 V a proto se články k dosažení vyššího napětí a proudu zapojují sériově popř. paralelně pomocí vodivých pásků. [8], [9]

Účinnost fotovoltaických článků v závislosti na typu substrátu:

Použitý materiál	Účinnost η (%)	
	Od	Do
Amorfní křemík	4	8
Polykrystalický křemík	10	18
Monokrystalický křemík	13	34

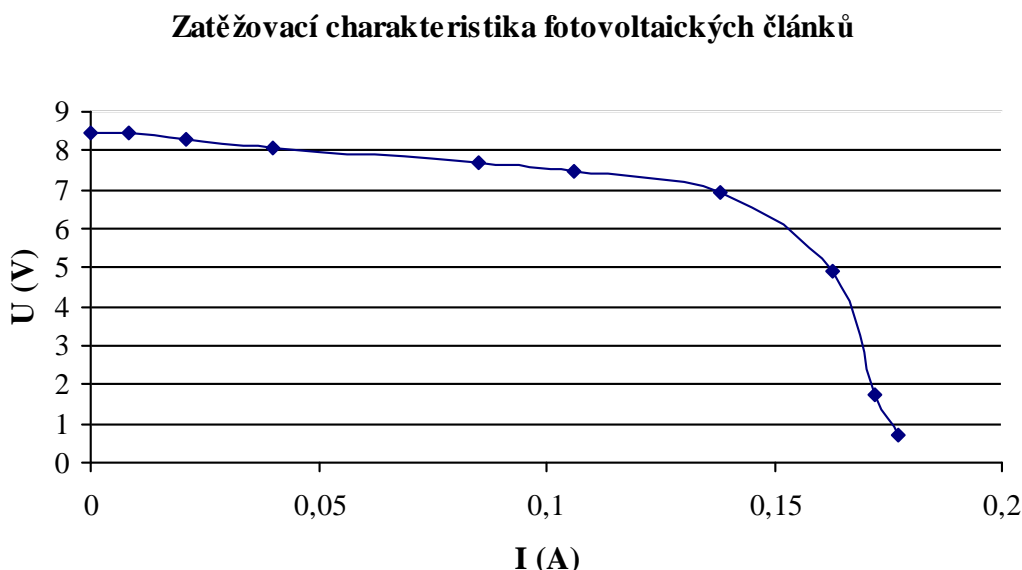
Tab. 1 Účinnost fotovoltaických článků, [9]

7.3 Ověření možnosti využití fotovoltaických článků



Obr. 12 Použitý fotovoltaický článek 3 V/430 mA

V tomto případě bylo provedeno měření se dvěma do série zapojených článků, u nichž výrobce udává, že jsou schopny každý z nich dodávat 3 V/430 mA. Tento údaj je však jen teoretický, ve skutečnosti záleží na okolních podmínkách a okolním dopadajícím světelném záření. Rozměry fotovoltaického článku jsou 102x198x1,2 mm. Na obr. 12 je zobrazený použitý fotovoltaický článek a na obr. 13 je zobrazena zatěžovací charakteristika těchto dvou do série zapojených článků.



Obr. 13 Zatěžovací charakteristika použitých fotovoltaických článků

7.4 Výhody a nevýhody použití solární energie

Ze zatěžovací charakteristiky uvedené na obr. 13 je patrné, že tyto fotovoltaické články nejsou schopny dodat potřebné množství energie pro nabíjení vybraného Li-Pol akumulátoru. Navíc další značnou nevýhodou by byly rozměry fotovoltaických článků, které by výrazně převyšovaly vlastní rozměry fotbalového robota. Jelikož při fotbalovém zápasu do sebe roboti značně narážejí, navíc by hrozilo také jejich poškození. Z těchto důvodů jsou fotovoltaické články nevhodné pro tuto aplikaci.

7.5 Elektromagnetická indukce

Elektromagnetická indukce je jev, ke kterému dochází v nestacionárním, nestálém, měnícím se magnetickém poli. Toto magnetické pole v cívce vytváří indukované elektrické pole, které charakterizuje indukované elektromotorické napětí. Když je k cívce připojen elektrický obvod, prochází jím indukovaný elektrický proud. Přenos energie je tedy realizován pomocí této elektromagnetické indukce probíhající mezi vysílací a přijímací cívkou. Vysílací cívka je napájena střídavým napětím a cívkou tedy protéká střídavý proud. Ten vyvolá v okolí cívky magnetické pole charakterizované střídavým magnetickým tokem Φ , který se uzavírá částečně v magnetickém materiálu, na kterém je navinuta vysílací a přijímací cívka. Tento střídavý magnetický indukční tok Φ způsobí dle Faradayova zákona naindukování napětí na přijímací cívce.

Mezi vysílací a přijímací cívkou se však nachází vzduchová mezera, která způsobí značný rozptyl magnetického toku Φ , a proto je účinnost tohoto přenosu velmi malá.

Ampérův zákon – zákon celkového proudu

Integrál skalárního součinu magnetické indukce a vektoru délkového elementu po uzavřené orientované křivce je násobkem celkového proudu I_C , obepnutého touto křivkou. [10]

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu \cdot I_C \quad (1)$$

Orientace uzavřené křivky je volena v kladném smyslu otáčení (proti hodinovým ručičkám). Smysly uzavřených proudů se určí pomocí pravidla pravé ruky. Ohnuté prsty kolem uzavřené křivky ve směru její orientace a vztyčený palec ukazují kladný směr proudu.

Faradayův zákon magnetické indukce

Faradayův zákon magnetické indukce říká, že indukované elektromotorické napětí U_i je rovno záporně vzaté časové změně celkového magnetického indukčního toku Φ_C . [10]

$$U_i = -\frac{d\Phi_C}{dt}, \text{ (V)} \quad (2)$$

Rozlišujeme magnetický indukční tok jedním závitem:

$$\phi = \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}, \text{ (Wb)} \quad (3)$$

A celkový magnetický indukční tok tekoucí všemi závity:

$$\phi_C = \iint N \cdot \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}, \text{ (Wb)} \quad (4)$$

Vlastní indukčnost cívky

Vlastní indukčnost cívky L je definována jako podíl celkového magnetického indukčního toku Φ_C tekoucího celkovou plochou všech její závitů a proudu I , který toto pole budí. [12]

$$L = \frac{\Phi_C}{I}, \text{ (H)} \quad (5)$$

Velikost magnetického indukčního toku generovaného vysílací cívkou se vypočte:

$$L_V = \frac{\Phi_{C,V}}{I_V} \rightarrow \Phi_{C,V} = L_V \cdot I_V \quad (6)$$

Z celkového magnetického indukčního toku $\Phi_{C,V}$ se podle vztahu (4) vypočte velikost magnetické indukce B .

Bude se také předpokládat, že magnetická indukce je konstantní v celé ploše a že vektor plochy S je rovnoběžný s vektorem magnetické indukce B , díky těmto úvahám může být provedena následující úprava výrazu:

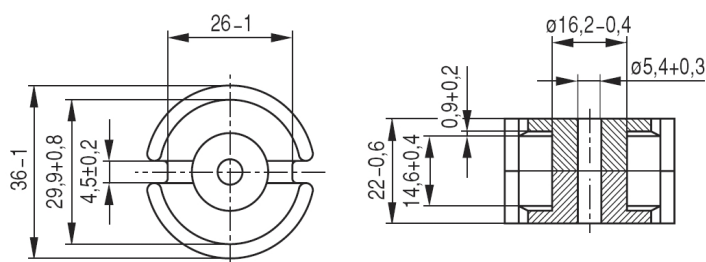
$$\Phi_{c,v} = \iint N \cdot B_v \cdot dS = N \cdot B_v \cdot \iint dS = N \cdot B_v \cdot S \rightarrow B_v = \frac{\Phi_{c,v}}{N \cdot S} \quad (7)$$

Velikost magnetické indukce B_v , která je vytvořena vysílací cívkou, však není shodná s magnetickou indukcí B_p indukující napětí v přijímací cívce. To je způsobeno rozptylem, který se označuje jako ξ .

$$B_p = \xi \cdot B_v, \text{ (Wb)} \quad (8)$$

7.6 Ověření možnosti využití elektromagnetické indukce

Pro vysílací a přijímací část zde byly použity dvě totožné cívky kruhového průřezu navinuté na hrníčkových jádrech s indukčností přibližně $L = 155 \mu\text{H}$. Na obr. 14 je zobrazeno použité hrníčkové jádro vyrobené z feritového materiálu s obchodním označením H12. Hmotnost jedné poloviny jádra včetně navinuté cívky je $m = 0,05 \text{ kg}$.



Obr. 14 Hrničkové jádro RM36X22

Počáteční permeabilita	μ	(-)	1260 $\pm 25 \%$
Magnetická indukce při intenzitě magnetického pole	B	(mT)	420
	H	($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)	1000
Koercitivní síla	H_C	($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)	30
Měrný ztrátový činitel při kmitočtu	$\text{tg } \delta/\mu_i$	(-)	$< 10 \cdot 10^{-6}$
	f	(kHz)	100
Curieho bod	T_C	($^{\circ}\text{C}$)	> 160
Měrný teplotní činitel	α	(K^{-1})	0 až $3 \cdot 10^{-6}$
Měrný elektrický odpor	ρ	($\Omega \cdot \text{m}$)	1
Měrná hmotnost	d	($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	4800

Tab. 2 Technická specifikace použitého feromagnetického materiálu H12, [13]

Feritové materiály FONOX (Pramet Šumperk) tvoří podle chemického složení 3 skupiny:

- Manganato-zinečnaté ferity $(\text{Mn}, \text{Zn})\text{O} \cdot \text{Fe}^{2+}\text{O}^{3-}$, označovány jako materiály H
- Nikelnato-zinečnaté ferity $(\text{Ni}, \text{Zn})\text{O} \cdot \text{Fe}^{2+}\text{O}^{3-}$, označovány jako materiály N
- Hořečnato-zinečnaté ferity $(\text{Mg}, \text{Mn}, \text{Zn})\text{O} \cdot \text{Fe}^{2+}\text{O}^{3-}$, označovány jako materiály HR, [13]

	Indukčnost	Odpor vinutí	Počet závitů
Vysílací cívka	$L_V = 155 \mu\text{H}$	$R_V = 99 \text{ m}\Omega$	$N_V = 42$
Přijímací cívka	$L_P = 152 \mu\text{H}$	$R_P = 102 \text{ m}\Omega$	$N_P = 42$

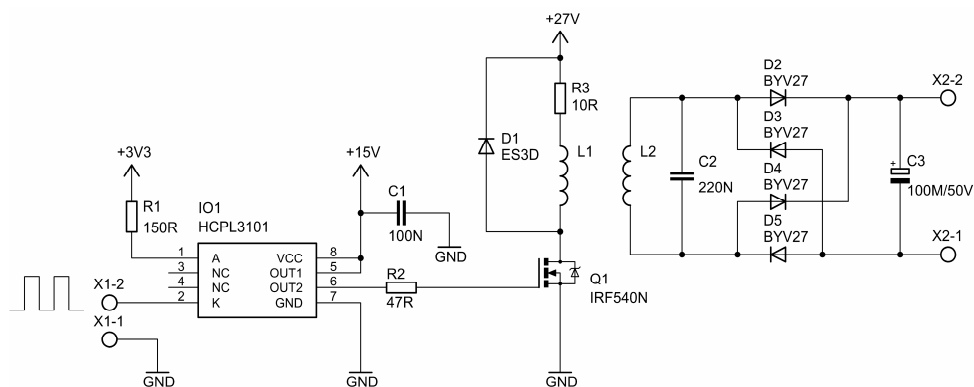
Tab. 3 Parametry vysílací a přijímací cívky



Obr. 15 Prototyp vysílací cívky navinuté na hrníčkovém jádře

7.6.1 Měření na vysílací a přijímací cívkce

V případě bezdrátového přenosu vysokofrekvenční energie pomocí elektromagnetické indukce bylo provedeno následující měření. Na obr. 16 je zobrazeno experimentální schéma vysílací a přijímací části pro zjištění spínací frekvence, při níž bude přenos energie nejefektivnější.



Obr. 16 Schéma zapojení obvodu pro přenos vysokofrekvenční energie

Na obr. 15 je zobrazena vysílací cívka navinutá na již zmíněném hrníčkovém jádře. Vysílací cívka vykazovala při 42 navinutých závitěch indukčnost $L_V = 155 \mu\text{H}$ a přijímací cívka při stejném počtu závitů indukčnost $L_P = 152 \mu\text{H}$. Při pokusu s cívkami na hrníčkových jádrech byla vysílací cívka buzena frekvencí 20 kHz. Na obr. 17 je zobrazena zatěžovací charakteristika právě pro tuto frekvenci.

Vysílací cívka byla napájena z výkonového laboratorního zdroje s nastaveným napětím $U_1 = 27 \text{ V}$ a byla buzena proudem přibližně $I_1 = 0,7 \text{ A}$. Vztah (9) naznačuje výpočet účinnosti přenosu energie pro naindukované výstupní napětí $U_2 = 10,09 \text{ V}$. Vzdálenost mezi cívkami byla $d = 1 \text{ mm}$.

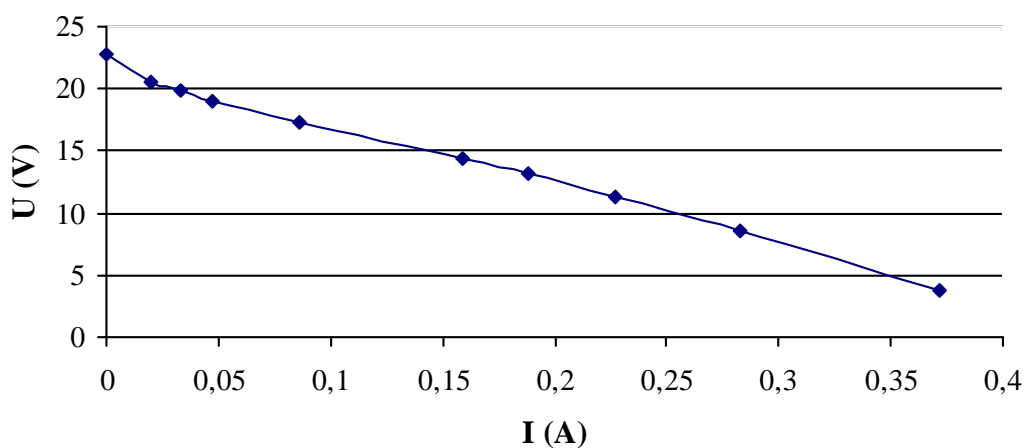
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} \cdot 100 = \frac{10,09 \cdot 0,252}{27 \cdot 0,7} \cdot 100 = 13,45\% \quad (9)$$

η ...účinnost, (%)

P_2 ...výkon na výstupu přijímací části, (W)

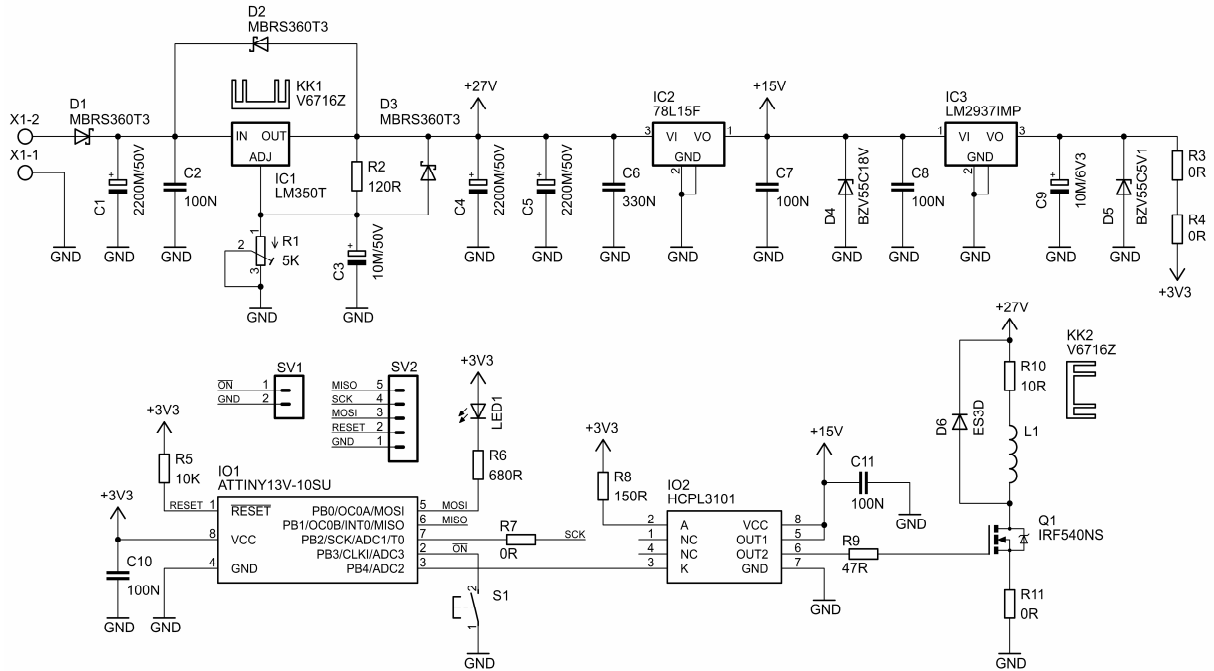
P_1 ...výkon na vstupu vysílací části, (W)

Zatěžovací charakteristika přenosu vysokofrekvenční energie



Obr. 17 Zatěžovací charakteristika pro přenos vysokofrekvenční energie

7.6.2 Schéma zapojení vysílací části



Obr. 18 Schéma zapojení vysílací části přenosu vysokofrekvenční energie

7.6.3 Popis zapojení vysílací části

Pro správnou funkci vysílacího obvodu bylo zapotřebí vytvořit napájecí zdroj se třemi velikostmi výstupního napětí +27 V, +15 V a +3,3 V. Monolitický stabilizátor IC_1 je stabilizátor s nastavitelným výstupním napětím od 1,2 V do 33 V a s výstupním proudem 3 A. Rezistory R_1 a R_2 slouží pro nastavení výstupního napětí +27 V, kterým bude napájena vysílací cívka.

Kondenzátor C_1 zde slouží k vyhlazení vstupního napětí stabilizátoru a kondenzátory C_3 , C_4 a C_5 jsou zde použity pro zlepšení stability a odezvy výstupního napětí na skokovou změnu zátěže. Diody D_2 a D_3 zde zabráňují přetížení stabilizátoru IC_1 napětím opačné polaritě v případě možného vzniku zkratu na kondenzátoru C_3 nebo na zátěži. Kondenzátor C_3 zde omezuje kolísání úbytku napětí na rezistoru R_1 , které může vznikat vlivem kolísání proudu I_{ADJ} , tedy resp. kolísání vlastní spotřeby obvodu při změně zátěže, nebo hodnoty vstupního napětí. Úkolem tohoto kondenzátoru C_3 je tedy zlepšení potlačení zvlnění výstupního napětí. Diode D_1 zde zamezuje nežádoucímu přepólování vstupního napětí, které se může pohybovat v rozmezí od 30 V do 35 V.

Vztah (10) naznačuje výpočet výstupního napětí stabilizátoru IC_1 pro konkrétní hodnoty odporů R_1 a R_2 .

$$U_O = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} \cdot R_2 \quad (10)$$

U_O ...výstupní napětí stabilizátoru, (V)

U_{REF} ...referenční napětí, úbytek napětí na rezistoru R_1 , (V)

I_{ADJ} ...proud tekoucí z výstupu ADJ stabilizátoru IC_1 , (A)

R_1, R_2 ...odpory určující velikost výstupního napětí, (Ω)

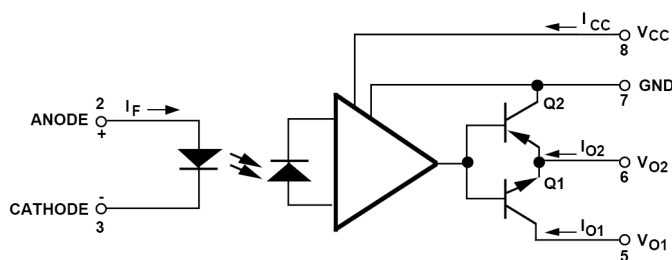
Vztah (11) uvádí výpočet hodnoty odporu R_2 pro výstupní napětí +27 V. Proud I_{ADJ} , velikost rezistoru R_1 a velikost referenčního napětí U_{REF} uvádí výrobce ($I_{ADJ} = 50 \mu A$, $R_1 = 120 \Omega$, $U_{REF} = 1,25 V$). [14]

$$R_2 = \frac{U_O - U_{REF}}{\frac{U_{REF}}{R_1} + I_{ADJ}} = \frac{27 - 1,25}{\frac{1,25}{120} + 50 \cdot 10^{-6}} = 2460,19 \Omega \quad (11)$$

Na potenciometru R_2 bude tedy nastavena hodnota 2,4 k Ω .

Stabilizátor IC_2 je monolitický stabilizátor s pevným výstupním napětím +15 V a výstupním proudem 100 mA. Tento stabilizátor tak vytváří napětí potřebné k řízení spínání výkonového MOSFET tranzistoru Q_1 . Stabilizátor IC_3 je opět monolitický stabilizátor s pevným napětím +3,3 V a výstupním proudem 100 mA. Tento stabilizátor bude sloužit k napájení řídicí části, tedy mikrokontroléru AVR ATtiny13. Kondenzátory C_6 až C_9 zde plní funkci blokových kapacit. Pro generování spínací frekvence, kterou bude spínán výkonový MOSFET tranzistor Q_1 , je použit mikrokontrolér AVR ATtiny13. Zapnutí, resp. vypnutí generování spínacích pulsů je ovládáno pomocí tlačítka S_1 a signalizováno LED diodou na výstupu PB0 mikrokontroléru IO_1 . Blokový kondenzátor C_{10} zde slouží k vyhlazení napájecího napětí mikrokontroléru. Konektor SV_1 je programovací konektor, který zde slouží pro připojení ISP programátoru a k naprogramování mikrokontroléru ATtiny13. Zdrojový kód pro tento mikrokontrolér byl napsán v prostředí CodeVisionAVR C Compiler Evaluation v1.25.3 (zdrojový kód viz. PŘÍLOHA Č. VI).

K řízení spínání výkonového MOSFET tranzistoru spínaného na frekvenci řádově desítky kHz je vhodné použít speciální obvod určených právě pro jeho buzení. V tomto případě byl vybrán optočlen HCPL3101, jehož vnitřní struktura je uvedena na obr. 19. Z obrázku je patrné, že vstup i výstup tohoto obvodu jsou galvanicky oddělené a spínání tak může být řízeno standardním TTL signálem z mikrokontroléru IO_1 (výstup PB4). Rezistory R_8 a R_9 určují velikosti proudu vstupní a výstupní části obvodu a kondenzátor C_{11} zde slouží k blokování napájení obvodu.



Obr. 19 Vnitřní struktura obvodu HCPL3101, [15]

Vysílací cívka je tedy buzena pomocí jednočinného blokujícího budiče, který představuje výkonový MOSFET tranzistor řízený výše uvedeným optočlenem. Jelikož zde bude výkonový tranzistor spínat induktivní zátěž, je nutné jej doplnit o ochrannou velmi rychlou diodou D_6 . Při rozpojování obvodu s induktivní zátěží totiž dochází k naindukování záporných napěťových špiček na cívce, jejichž velikost závisí hlavně na velikosti indukčnosti a rychlosti rozpojení obvodu. Proto zde musí být použita tato ochranná dioda, která zajistí bezproblémové spínání induktivní zátěže, aniž by hrozilo zničení spínacího tranzistoru. Níže jsou uvedeny bližší charakteristiky použitého MOSFET tranzistoru IRF540NS.

Vlastnosti tranzistoru IRF540NS:

Maximální napětí mezi Drain a Source U_{DS}	100 V
Maximální proud I_D	33 A
Maximální napětí U_{GS}	± 20 V
Odpor R_{DS} v sepnutém stavu	0,044 Ω
Maximální ztrátový výkon P_D	130 W
Vstupní kapacita C_{ISS}	1960 pF, [16]

7.6.4 Výkonová ztráta

Jediné prvky v tomto vysílacím obvodu, které jsou výkonově namáhány, a je tedy nutné je chladit, je stabilizátor LM350T a výkonový rezistor R_{10} v pouzdře TO247 (označení rezistoru je MHP 100, který je k dostání u BI Technologies). Proto je nutné tyto součástky opatřit chladičem, jehož výpočet je uveden v následujících odstavcích.

Celkový tepelný odpor R_{th} se vypočte jako poměr rozdílu maximální pracovní teploty čipu T_J a teploty okolí chladiče T_A ke ztrátovému výkonu na součástce. Tento tepelný odpor je pak dále roven součtu dílčích teplotních odporů $R_{th(J-C)}$, $R_{th(C-H)}$ a $R_{th(H-A)}$.

$$R_{th} = \frac{T_J - T_A}{P} = R_{th(J-C)} + R_{th(C-H)} + R_{th(H-A)}, \quad (12)$$

T_J ... maximální pracovní teplota přechodu, ($^{\circ}\text{C}$)

T_A ... teplota okolí chladiče, ($^{\circ}\text{C}$)

P ... maximální ztrátový výkon na součástce, (W)

R_{th} ... celkový teplotní odpor mezi polovodičem a okolím, ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$)

$R_{th(J-C)}$... teplotní odpor mezi polovodičem a pouzdrem součástky, ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$)

$R_{th(C-H)}$... teplotní odpor mezi pouzdrem součástky a chladičem, ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$)

$R_{th(H-A)}$... teplotní odpor mezi chladičem a okolím, ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$), [17]

Výrobce stabilizátoru LM350T uvádí, že teplotní odpor mezi polovodičem a pouzdrem součástky je $R_{th(J-C)} = 3^{\circ}\text{C/W}$ a maximální teplota přechodu je $T_J = 125^{\circ}\text{C}$. [16]

U výkonového rezistoru 10 Ω /100 W uvádí výrobce, že teplotní odpor mezi odporovou vrstvou a pouzdrem součástky je $R_{th(J-C)} = 1,3 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ a maximální teplota je $T_J = 155 \text{ }^{\circ}\text{C}$. [18]

Na výše uvedeném stabilizátoru bude výkonová ztráta maximálně kolem hodnoty $P = 6 \text{ W}$ a výkonová ztráta na výkonovém rezistoru je přibližně $P = 17 \text{ W}$.

Stabilizátor LM350T:

$$R_{th} = \frac{T_J - T_A}{P} = \frac{125 - 55}{6} = 11,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \quad (13)$$

$$R_{th} \geq R_{th(J-C)} + R_{th(C-H)} + R_{th(H-A)} \quad (14)$$

$$R_{th(H-A)} \leq R_{th} - R_{th(J-C)} - R_{th(C-H)} = 11,7 - 3 - 0,3 = 8,4 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \quad (15)$$

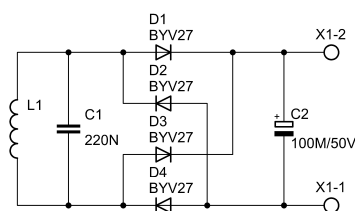
Výkonový rezistor 10 Ω /100 W:

$$R_{th} = \frac{T_J - T_A}{P} = \frac{155 - 55}{17} = 5,9 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \quad (16)$$

$$R_{th(H-A)} \leq R_{th} - R_{th(J-C)} - R_{th(C-H)} = 5,9 - 1,3 - 0,3 = 4,3 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \quad (17)$$

Ze vztahu (15) a (17) vyplývá, že pro chlazení stabilizátoru LM350T i výkonového rezistoru 10 Ω /100 W budou použity dva stejné chladiče s označením V6716Z (GES Electronics) s teplotním odporem $R_{th(H-A)} = 2,3 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$.

7.6.5 Schéma zapojení přijímací části



Obr. 20 Schéma zapojení přijímací části přenosu vysokofrekvenční energie

7.6.6 Popis zapojení přijímací části

Přijímací část je tvořena přijímací cívkou L_1 , která spolu s kondenzátorem C_1 tvoří paralelní rezonanční obvod kmitající na stejné frekvenci, kterou je buzena vysílací cívka. Aby bylo možné naindukované napětí na přijímací cívce použít pro napájení nabíjecího obvodu a nabíjet tak akumulátor, je nutné nejdříve provést usměrnění a filtraci. Usměrnění je zde realizováno pomocí dvoucestného usměrňovače tvořeného velmi rychlými usměrňovacími diodami D_1 až D_4 .

Následně je nutné napětí vyfiltrovat, aby se tak na výstupu získalo stejnosměrné napětí. Vztahy (18) a (19) uvádí výpočet velikosti filtrační kapacity C_2 (při dosazení do vzorce je nutné počítat v radiánech). [19]

$$C_2 \geq \frac{I \cdot \arccos\left(-\frac{U_{MIN}}{U_{MAX}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (U_{MAX} - U_{MIN})} \quad (18)$$

C_2 ...filtrační kapacita, (F)

I ...konstantní vybíjecí proud kondenzátoru, (A)

U_{MIN} ...minimální napětí na filtračním kondenzátoru, (V)

U_{MAX} ...maximální napětí na filtračním kondenzátoru, (V)

f ...frekvence, (Hz)

Vztah (19) uvádí výpočet filtrační kapacity pro maximální vybíjecí proud $I = 0,25$ A, frekvenci $f = 20$ kHz a rozkmit napětí na filtračním kondenzátoru $U_{MIN} = 9,9$ V a $U_{MAX} = 10$ V.

$$C_2 \geq \frac{I \cdot \arccos\left(-\frac{U_{MIN}}{U_{MAX}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (U_{MAX} - U_{MIN})} = \frac{0,25 \cdot \arccos\left(-\frac{9,9}{10}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot (10 - 9,9)} = 59,7 \mu\text{F} \quad (19)$$

Bude tedy zvolena velikost filtrační kapacity $C_2 = 100 \mu\text{F}$.

7.7 Výhody a nevýhody přenosu vysokofrekvenční energie

Značnou výhodou přenosu vysokofrekvenční energie je určitě nepřítomnost kontaktu mezi vysílací a přijímací částí. V tomto případě by stačilo, aby mobilní robot nesoucí přijímací cívku na své vrchní straně se přesunul pod vysílací cívku, mezi nimiž by byla vzduchová mezera přibližně 1 mm. Jelikož se však v tomto případě ale jedná o velmi malé cívky navinuté na malých feritových hrnčících, navedení mobilního robota by muselo být velmi přesné, jinak by naindukované napětí nedosahovalo dostatečné velikosti.

Další nevýhodou tohoto přenosu je také rušení, které je vyzařováno do okolí a které je díky vzduchové mezeře mezi jádry opravdu značné. Navíc také váha a rozměry přijímací cívky, kterou by si mobilní robot s sebou vozil, by zbytečně zatěžovaly tohoto robota a přispívaly by k rychlejšímu vybíjení akumulátoru, což popírá podstatu tohoto řešení.

Mimo to účinnost tohoto přenosu vysokofrekvenční energie je poměrně velmi malá, tuto skutečnost naznačuje vztah (9). Na výstupu přijímací části se tak nepodařilo získat potřebnou velikost napětí resp. proudu pro nabíjení vybraného Li-Pol akumulátoru (viz. zatěžovací charakteristika na obr. 17) a tudíž je tento způsob přenosu energie opět nevhodný pro tuto aplikaci.

8 Kontaktní způsob přenosu energie

U kontaktního způsobu přenosu elektrické energie je přenos této energie realizován fyzickým kontaktem dvou vodivých materiálů. V tomto případě je účinnost při zanedbání přechodových odporů a odporu vedení prakticky ideální. Jedinou značnou nevýhodou tohoto způsobu přenosu energie je právě fyzický kontakt těchto materiálů, u nichž se vlivem opotřebení zhoršují jejich vlastnosti (přechodový odpor, mechanické a chemické vlastnosti). V následujících kapitolách bude podrobněji rozebrána problematika jak použitelných materiálů na kontakty, tak jednotlivé vlastnosti a charakteristiky kontaktů.

8.1 Vodivé materiály

V technické praxi se jako vodivé materiály používají nejčastěji kovy, jejichž rezistivita ρ se pohybuje v rozmezí od 10^{-6} do $10^{-8} \Omega \cdot m$. Do této široké skupiny patří nejen materiály používané pro samotné vedení proudu, které mají rezistivitu ρ řádově $10^{-8} \Omega \cdot m$, ale i materiály speciální, u kterých se kromě vodivosti požadují i některé další specifické požadavky. Mezi tyto materiály se řadí např. kovy a slitiny, u nichž se požadují dobré mechanické, tepelné i chemické vlastnosti. [20]

8.2 Druhy elektrických spojů a kontaktů

Elektrické kontakty se podle konstrukčního uspořádání, podmínek při jejich provozování, charakteru namáhání a jejich opotřebování výrazně liší. V závislosti od vyjmenovaných charakteristických znaků je možné rozlišit následující základní způsoby styků. Jedná se především o pevný nebo-li nepružný styk, u kterého se kontakty v průběhu provozování kontaktní plochy od sebe neoddělují, a nebo kluzný či valivý styk, při kterém se stykové plochy po sobě mohou pohybovat bez toho, aniž by došlo k přerušení elektrického kontaktu mezi nimi. [20]

8.3 Charakteristické veličiny styků a kontaktů

Na vytvoření spolehlivého spojení se vyžaduje podstatná znalost následujících charakteristických veličin a poměrů:

- Stykový odpor
- Ztráty proudovodičů a spojů (kontaktů)
- Oteplení proudovodičů a kontaktů
- Materiály proudovodičů a spojů
- Elektrické a mechanické hlediska při vytváření spojů (změna odporu, zkratové namáhání, mechanické namáhání, dilatace, relaxace, atd.)
- Chemické hlediska při vytváření spojů (elektrochemická koroze, vlivy prostředí, atd.). [20]

8.3.1 Stykový odpor

Z obr. 21 je patrné, že pokud se změří napětí mezi body A a B na vodičích stejného materiálu a průřezu při zatížení proudem I_e , zjistí se, že v případě b), kdy bylo vytvořeno stykové místo (vodič byl ve svém středu přerušen a potom tyto dvě poloviny byly k sobě tlačeny přítláčnou silou F), je úbytek napětí podstatně vyšší než je tomu u nepřerušného vodiče.

Protože jsou v obou případech zatěžovací proudy stejné, zvýšení úbytku napětí v případě b) je způsobené stykovým odporem R_s , který se přičte k odporu vodiče R_v s délkou l . Součet těchto odporů pak dává celkový odpor mezi body A a B, který se může považovat za odpor přechodu R_p (kontaktní odpor):

$$R_p = R_v + R_s = \rho \cdot \frac{l}{S} + R_s \quad (20)$$

R_p ...přechodový odpor, (Ω)

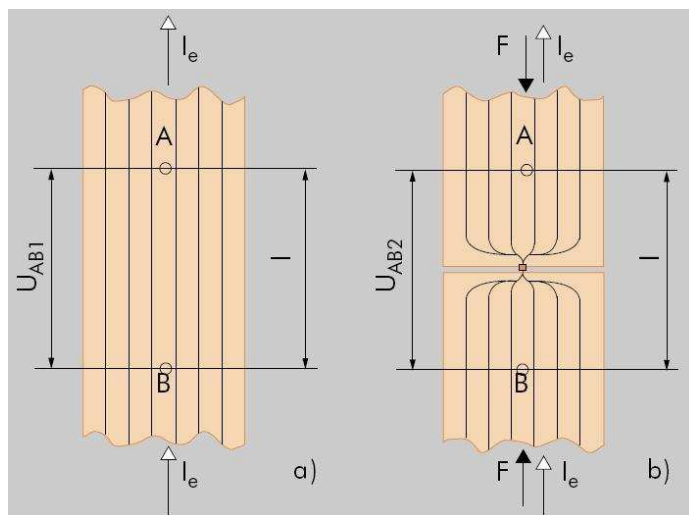
R_v ...odpor vodiče, (Ω)

R_s ...stykový odpor, (Ω)

ρ ...měrný elektrický odpor, ($\Omega \cdot \text{m}$)

l ...délka vodiče, (m)

S ...průřez vodiče, (m^2)



Obr. 21 Stykový odpor mezi kontakty, [20]

Kvalitu styku určuje právě tento stykový odpor R_s , který se skládá ze dvou částí, z úžinového odporu R_U a z přechodového odporu cizích vrstev R_{CV} . Úžinový odpor je způsobený zhušťováním proudnic při přechodu z jednoho kontaktu do druhého. Avšak i v případě hladkých povrchů kontaktů se mikroskopickým pozorováním naleznou vždy nějaké nerovnosti. Povrch kontaktu je tedy nerovnoměrný (drsňý). [20]

Zvýšením přitlačné síly se mikroskopické plošky stykových bodů zvětšují, dokonce vznikají i nové stykové body. Hodnotu stykového odporu ovlivňují i jiné faktory, jako je materiál kontaktů, kovové oxidy, sulfidy a jiné znečišťující vrstvy vznikající na povrchu kontaktů. Tento odpor se označuje jako přechodový odpor cizích vrstev R_{CV} , jehož velikost závisí jak na teplotě stykového místa, tak i na čase, který je k dispozici na vznik vrstvy. Podle naměřených hodnot je možné stykový odpor přibližně určit podle následujícího vztahu:

$$R_s = R_U + R_{CV} = \frac{c}{(0,1 \cdot F)^K} \quad (21)$$

R_s ...stykový odpor, (Ω)

R_U ...úžinový odpor, (Ω)

R_{CV} ...přechodový odpor cizích vrstev, (Ω)

c ...materiálová konstanta, (-)

F ...přítlačná síla, (N)

K ...tvarový koeficient styku, (-)

Materiálová konstanta c je závislá na materiálu kontaktů a na stavu povrchu kontaktního styku (např. pro kontakt čistá měď – měď je 0,008 až 0,014, oxidovaná pocínovaná měď – pocínovaná měď je 0,03, a pro čistý hliník – hliník je 0,3 až 0,67). Tvarový koeficient styku K nabývá hodnoty pro bodový styk 0,5, pro přímkový styk 0,5 až 0,7 a pro plošný styk 0,6 až 1.

Tento empirický vztah je samozřejmě vhodný jen pro přibližný výpočet, protože je velmi obtížné přesně určit velikost skutečných stykových ploch.

Vliv oxidovaného povrchu, např. vrstvy oxidu mědi, ukazuje následující orientační výpočet. Je předpokládána styková plocha s průměrem $d = 0,1$ mm a na povrchu kontaktů cizí vrstva tloušťky $h = 0,01$ μm , jejíž rezistivita je $\rho_{CV} = 100$ $\Omega\cdot\text{m}$. [20]

$$R_{CV} = \frac{4 \cdot \rho_{CV} \cdot 2 \cdot h}{d^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 100 \cdot 2 \cdot 10^{-8}}{(10^{-4})^2 \cdot \pi} = 254,6 \Omega \quad (22)$$

Úžinový odpor počítaný pro rezistivitu $\rho_{Cu55^\circ\text{C}} = 2 \cdot 10^{-8}$ $\Omega\cdot\text{m}$ je:

$$R_U = \frac{\rho_{Cu}}{2 \cdot \frac{d}{2}} = \frac{2 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot \frac{10^{-4}}{2}} = 2 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (23)$$

Z předchozích výpočtů je patrné, že úžinový odpor je o několik řádů nižší než odpor cizích vrstev. V konečném důsledku je možné konstatovat, že cizí vrstvy vždy způsobují, v porovnání s čistým kovovým stykem, zvýšení kontaktního odporu. Naší úlohou je tedy udržet toto zvýšení ve stanovených mezích při zohlednění dovoleného oteplení. [20]

8.3.2 Ztráty proudovodičů a kontaktů

Ztráty proudovodičů a kontaktů jsou určeny proudem proudové dráhy, jeho rozdělením v proudových drahách, i odporem vodivých částí a styků. Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, určujícím faktorem je kvalita materiálů použitých na proudovou dráhu a kontakt. Při určení ztrát proudové dráhy se nejprve vypočítá odpor kontaktu i proudové části bez stykového místa:

$$R_V = \rho_V \cdot \frac{l_V}{S_V} \rightarrow P_V = I^2 \cdot R_V \quad (24)$$

R_V ...odpor počítaného úseku, (Ω)

ρ_V ...rezistivita materiálu počítaného úseku, ($\Omega \cdot m$)

l ...délka počítaného úseku, (m)

S ...průřez počítaného úseku, (m^2)

I ...zatěžovací proud tekoucí počítaným úsekem, (A)

P_V ...ztráty příslušného úseku, (W)

Ztráty stykového místa, resp. místa spoje se pak určí z přibližné hodnoty stykového odporu vypočítané podle empirického vztahu (21):

$$R_S = \frac{c}{(0,1 \cdot F)^K} \rightarrow P_S = I^2 \cdot R_S, (W), [20] \quad (25)$$

8.3.3 Oteplení kontaktů a proudovodičů

Průchodem zatěžovacího proudu přes kontakty, které jsou charakterizovány svým stykovým odporem, dochází k jejich zahřívání. Už i malé oteplení kontaktů přispívá k oxidaci stykových ploch.

Větší oteplení může pak vést k změknutí kontaktů, roztavení stykových ploch či ke svaření kontaktů. Oteplení stykového bodu je teoreticky úměrné druhé mocnině úbytku napětí na stykovém místě:

$$\Delta T_S = T_S - T_O = \frac{\Delta U_S^2}{8 \cdot \lambda \cdot \rho} \quad (26)$$

T_S ...teplota stykového bodu ($^{\circ}C$)

T_O ...teplota proudovodiče v těsné blízkosti místa styku ($^{\circ}C$)

ΔU_S ...úbytek napětí na stykovém místě (V)

ρ ...rezistivita kontaktu ($\Omega \cdot m$)

λ ...koeficient tepelné vodivosti kontaktního materiálu ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), [20]

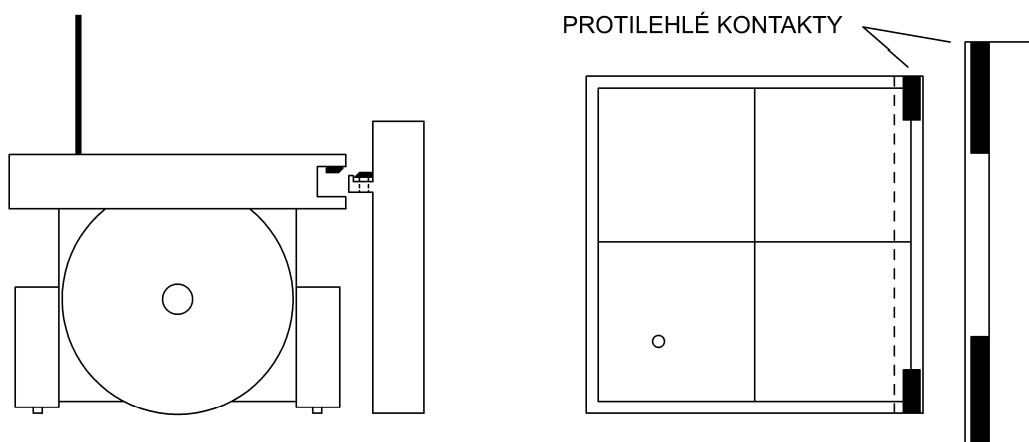
8.3.4 Materiály proudovodičů a spojů

V elektrotechnickém průmyslu se v převážné míře jako základní materiál proudovodičů používá měď nebo hliník, resp. jejich slitiny. Materiálem spojů může být měď, mosaz, zřídka železo, s povrchovou úpravou pozinkováním, poniklováním, postříbřením, atd.

Styky z čisté mědi nebo hliníku začínají na vzduchu oxidovat už při pokojové teplotě. Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, tato vrstva má velký odpor, a proto se doporučuje čištění a natírání povrchu kontaktů. Při porovnání oxidu mědi a hliníku je možné konstatovat, že odstranění tvrdého oxidu hliníku způsobuje mnoho problémů. Vrstva oxidu mědi je poměrně slabá a při běžných úpravách kontaktů se obvykle samočinně odstraňuje bez nutnosti použití mechanických pomůcek. V případě postříbřené mědi zde není žádný problém, neboť elektrická vodivost oxidu stříbra je prakticky stejného řádu jako vodivost neoxidovaného stříbra. Problémy nejsou ani v případě pozinkované mědi, neboť povlak tvořící se na povrchu pozinkované mědi se lehce odloupne a znovu dochází ke kovovému styku. [20]

8.4 Návrh kontaktního způsobu přenosu energie

V případě použití kontaktního způsobu přenosu energie by pro přívod napájení pro nabíjení vybraného Li-Pol akumulátoru stačily jen dva kontakty vhodně umístěné přímo na mobilním robotovi. Jelikož fotbaloví roboti během zápasu do sebe dosti narážejí, je nutné, aby nedošlo poškození či ke zkratování těchto kontaktů. Proto je nutné, aby kontakty pro přívod napájení byly zapuštěny do konstrukce fotbalového robota a nebyly tak snadno přístupné. Na obr. 22 je vyobrazeno možné řešení umístění kontaktů pro napájení nabíjecího obvodu. Umístění dvou kontaktů může být realizováno na zadní části fotbalového robota, kde by se do konstrukce vyfrézovala drážka, do níž by mohly být pak následně zasunuty dvě kontaktní plošky. Při dosednutí protilehlých odpružených kontaktů tak bude vytvořen plošný vodivý styk s přitlačnou silou vytvořenou vlastní vahou mobilního robota. Navíc takto realizované kontakty umožňují jednu značnou výhodu a to možnost nepřesného navedení mobilního robota na již zmíněné kontakty řádově s nepřesností na jednotky milimetrů, což u přenosu vysokofrekvenční energie nebylo možné.



Obr. 22 Možné řešení využití kontaktního způsobu přenosu energie

8.5 Výhody a nevýhody kontaktního způsobu přenosu energie

Výhody a nevýhody kontaktů jako takových už byly řečeny v kapitole 8.3. Značnou nevýhodou tohoto způsobu přenosu energie je právě opotřebení kontaktů, růst přechodového odporu či možnost poškození kontaktů. Naopak velká výhoda oproti přenosu vysokofrekvenční energie je právě v možném nepřesném navedení mobilního robota na zdroj elektrické energie (protilehlé kontakty mohou být větší než kontakty umístěné na robotovi, což umožní navedení mobilního robota s nepřesností řádově na jednotky milimetrů).

Tyto kontakty také výrazně neovlivní ani velikost ani hmotnost tohoto robota, tudíž nezatíží akumulátor, jakož to bylo v případě přijímací cívky u přenosu vysokofrekvenčního energie. Navíc zde není generováno žádné rušení a účinnost ve srovnání s přenosem vysokofrekvenční energie je výrazně vyšší. To umožňuje akumulátor nabíjet plným proudem a nabít tak akumulátor v nejkratším čase. Z těchto závěrů pak může být usouzeno, že je tento způsob přenosu energie vhodný pro tuto aplikaci.

9 Návrh nabíjecího obvodu

V následujících kapitolách bude podrobně rozebrána problematika návrhu nabíjecí části a to jak s využitím komerčně dodávaného speciálního obvodu BQ2057W, který zajišťuje algoritmus nabíjení Li-Pol akumulátoru, tak s využitím digitálního signálového procesoru DSP56F805, který mimo jiné zajišťuje řízení celého mobilního robota a pro který bude vytvořen vlastní nabíjecí algoritmus. Stávající digitální signálový procesor tak bude doplněn jen o nejnútnejší obvodové součástky, které budou zajišťovat nabíjení vybraného akumulátoru.

9.1 Nabíjecí obvod BQ2057W

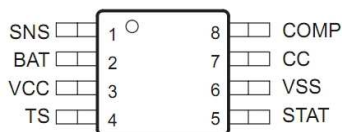
Hlavní řídicím prvkem níže navržené nabíječky je integrovaný obvod BQ2057W od firmy Texas Instruments. Tento integrovaný obvod zajišťuje kompletní autonomní správu nabíjení Li-Pol/Li-Ion akumulátorů složených ze dvou článků s konečným nabíjecím napětím 8,4 V.

Základní charakteristiky obvodu BQ2057W:

- Autonomní proces nabíjení Li-Pol/Li-Ion článků v lineárním režimu
- Možnost nastavení nabíjecího proudu jediným rezistorem
- Nabíjení hluboce vybitých akumulátorů malým nabíjecím proudem, tzv. předbíjení
- Automatické ukončení nabíjení při dosažení požadovaného napětí na akumulátoru
- Automatické znovu spuštění nabíjení při mírném poklesu napětí na akumulátoru
- Kontinuální monitorování teploty akumulátoru
- Dynamická kompenzace impedance akumulátoru za účelem redukce nabíjecího času

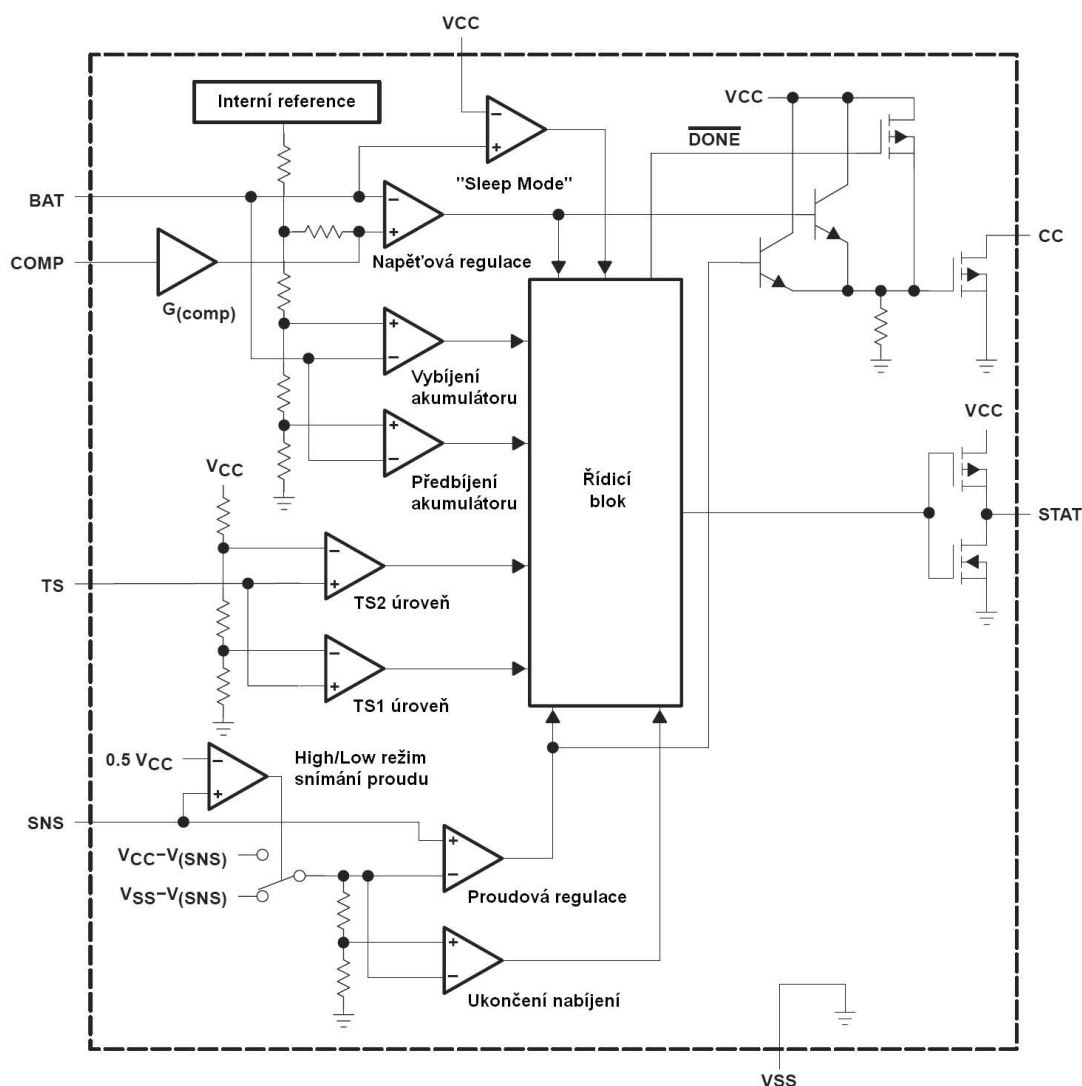
Integrovaný obvod BQ2057W je obvod, který zajišťuje nabíjení dvou Li-Pol nebo Li-Ion článků zapojených do série s konečným nabíjecím napětím 4,2 V (konečné nabíjecí napětí celého akumulátoru je tedy 8,4 V). Tento integrovaný obvod realizuje algoritmus rychlého nabíjení při konstantním proudu, pomalé dobíjení při konstantním napětím a dále také zajišťuje kontinuální monitorování teploty celého akumulátoru (v případě překročení předem definovaných dovolených teplot akumulátoru nabíjení okamžitě pozastaví). Navíc tento obvod umožňuje také nabíjení hluboce vybitých akumulátorů malým nabíjecím proudem, jehož velikost závisí na hodnotě jednoho nastavovacího rezistoru, který určuje i velikost nabíjecího proudu při rychlém nabíjení. [21]

9.1.1 Pouzdro obvodu BQ2057W



Obr. 23 Rozložení vývodů obvodu BQ2057W, [21]

9.1.2 Blokové schéma obvodu BQ2057W



Obr. 24 Blokové schéma obvodu BQ2057W, [21]

9.1.3 Popis jednotlivých vývodů

Pin	Symbol	Popis funkce
1	<i>SNS</i>	Vstup pro nastavení nabíjecího proudu
2	<i>BAT</i>	Vstup pro zpětné měření napětí akumulátoru
3	<i>VCC</i>	Napájení obvodu BQ2057W
4	<i>TS</i>	Vstup pro připojení externího termistoru pro měření teploty
5	<i>STAT</i>	Výstup signalizující proces nabíjení a chybový stav teploty
6	<i>VSS</i>	Zem napájení obvodu BQ2057W
7	<i>CC</i>	Výstup pro řízení nabíjení akumulátoru
8	<i>COMP</i>	Vstup pro připojení kompenzačních rezistorů, [21]

9.1.4 Elektrické charakteristiky

Maximální hodnoty

V_{CC}	-0,3 V až +18 V
SNS, BAT, TS, COMP	-0,3 V až ($V_{CC}+0,3$)V
Provozní teplota	-20 °C až +70 °C
Celková výkonová ztráta při 25 °C	300 mW

DC charakteristiky

Parametr	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Jedn.	Poznámka
----------	--------	------	------	------	-------	----------

Napájení

Napájecí napětí	U_{CC}	4,5	-	15	V	
Napájecí proud	$I_{VCC,S}$	-	-	10	μA	„Sleep Mode“
	I_{VCC}	-	2	4	mA	

Napěťová regulace

Reg. výstupní napětí	U_{REG}	8,317	8,4	8,484	V	BQ2057W
Nap. podmínka pro předbíjení	U_{PRE}	6,18	6,3	6,43	V	BQ2057W

Proudová regulace

Velikost proudu při předbíjení a při rychlém nabíjení je dána nastavovacím rezistorem R_{SNS} , resp. úbytkem napětí na tomto rezistoru.

Předbíjení	U_{SNS}	-	13	-	mV	BQ2057W
Rychlé nabíjení	U_{SNS}	113,6	125	137,5	mV	BQ2057W

Automatické znovu spuštění dobíjení

Nap. podmínka dobíjení	U_{RCH}	$V_{REG} - 0,196$	$V_{REG} - 0,2$	$V_{REG} - 0,204$	V	BQ2057W
------------------------	-----------	-------------------	-----------------	-------------------	---	---------

STAT

Výstup v log. 0	$U_{OL(STAT)}$	-	-	0,7	V	$I_{OL} = 10\text{mA}$
Výstup v log. 1	$U_{OH(STAT)}$	$V_{CC} - 0,5$	-	-	V	$I_{OH} = 5\text{mA}$

9.1.5 Popis nabíjení pomocí obvodu BQ2057W

Integrovaný obvod BQ2057W zajišťuje algoritmus nabíjení, který je složen ze tří částí: nabíjení malým proudem (předbíjení), rychlé nabíjení při konstantním proudu a pomalé dobíjení při konstantním napětí. Přejít mezi jednotlivými fázemi nabíjení je dán aktuálním napětím na akumulátoru, které se přivádí na vstup BAT. Je-li toto napětí nižší než napětí 6,3 V, znamená to, že je akumulátor hluboce vybit a je nutné jej nabíjet malým nabíjecím proudem (tzv. fáze předbíjení). Po ukončení fáze předbíjení obvod přechází do fáze rychlého nabíjení, kde se akumulátor nabíjí proudem určeným nastavovacím rezistorem (výpočet tohoto nabíjecího proudu je uveden v kapitole 9.1.8). Po ukončení fáze rychlého nabíjení obvod přechází do fáze pomalého dobíjení (nabíjení při konstantním napětí, viz. nabíjecí charakteristika uvedená v kapitole 9.1.7). V této fázi nabíjení proud tekoucí do akumulátoru postupně klesá až do doby, kdy je akumulátor plně nabit. Po úplném nabití akumulátoru je nabíjecí cyklus automaticky ukončen. Po skončení nabíjení se neustále měří napětí na akumulátoru a pokud toto napětí klesne pod definovanou úroveň, obvod zajistí znovu spuštění nabíjecího procesu.

Obvod zahrnuje také funkci hlídání teploty akumulátoru. Interval teplot, ve kterých se může teplota akumulátoru pohybovat při nabíjení je určena odporovým děličem připojeným mezi vývody VCC, GND a TS. Teplota se měří pomocí NTC nebo PTC termistoru, který se připojuje na vstup TS. V případě překročení teploty akumulátoru dojde k pozastavení nabíjecího procesu.

Průběh nabíjecího cyklu či chybové stavy teploty jsou signalizovány pomocí výstupu STAT. Tento výstup může nabývat třech stavů (log. 1 => proces nabíjení, log. 0 => ukončené nabíjení, stav vysoké impedance => chybový stav teploty nebo „Sleep Mode“). [21]

9.1.6 Hlídání teploty akumulátoru

Při nabíjení těchto akumulátorů je také nutné sledovat jejich teplotu. Při nesprávném nabíjení těchto akumulátorů může totiž dojít k jejich nadměrnému přehřívání a v extrémních případech při velmi nešetrném zacházení a při nabíjení vysokými proudy může také dojít k jejich vzplanutí. Obvod BQ2057W obsahuje funkci kontinuálního monitorování teploty akumulátoru pomocí termistoru a při překročení předem definované teploty okamžitě proces nabíjení pozastaví. Teplota může být snímána PTC nebo NTC termistorem (v tomto případě byl zvolen NTC termistor). Interval, ve kterém se může pohybovat teplota akumulátoru, je dán děličem tvořený odpory R_9 a R_{10} .

V tomto případě byl zvolen teplotní interval, ve kterém se může teplota akumulátoru při nabíjení pohybovat, od -5 °C do 55 °C. Níže je uveden výpočet pro odporový dělič, který tento interval určuje. Pro měření teploty byl použit termistor NTC640-10K, který vykazuje při teplotě -5 °C odpor $R_{COLD} = 42,16 \text{ k}\Omega$ a při teplotě 55 °C vykazuje odpor $R_{HOT} = 2,99 \text{ k}\Omega$. [22]

Pro NTC termistor platí následující vztahy:

$$R_9 = \frac{5 \cdot R_{COLD} \cdot R_{HOT}}{3 \cdot (R_{COLD} - R_{HOT})} = \frac{5 \cdot 42,16 \cdot 10^3 \cdot 2,99 \cdot 10^3}{3 \cdot (42,16 \cdot 10^3 - 2,99 \cdot 10^3)} = 5,36 \text{ k}\Omega \quad (27)$$

$$R_{10} = \frac{5 \cdot R_{COLD} \cdot R_{HOT}}{2 \cdot R_{COLD} - 7 \cdot R_{HOT}} = \frac{5 \cdot 42,16 \cdot 10^3 \cdot 2,99 \cdot 10^3}{2 \cdot 42,16 \cdot 10^3 - 7 \cdot 2,99 \cdot 10^3} = 9,94 \text{ k}\Omega \quad (28)$$

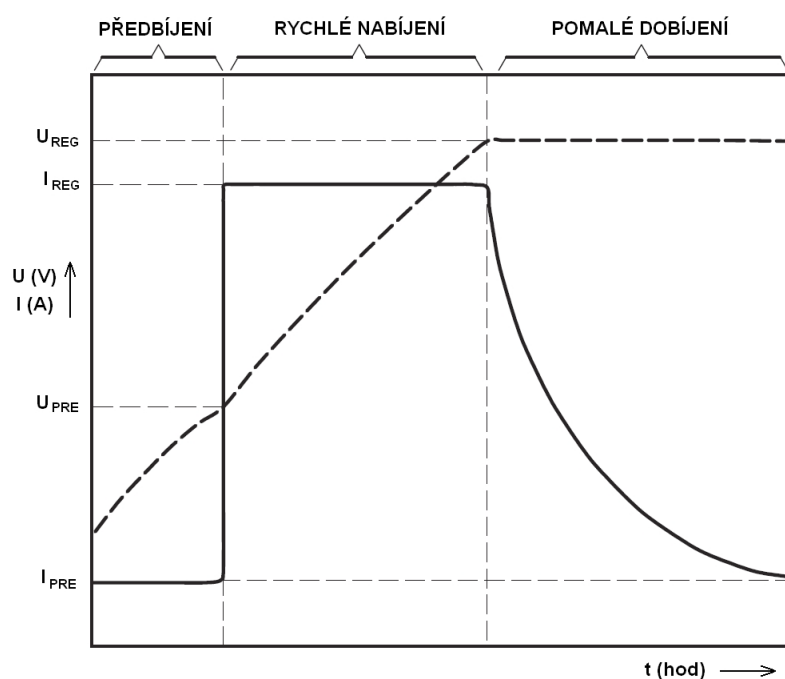
Budou tedy zvoleny rezistory $R_9 = 5,6 \text{ k}\Omega$ a $R_{10} = 10 \text{ k}\Omega$.

R_{COLD} ...hodnota odporu termistoru vymezující dolní část teplotního intervalu, (Ω)

R_{HOT} ...hodnota odporu termistoru vymezující horní část teplotního intervalu, (Ω)

R_9, R_{10} ...hodnoty odporů vymezující teplotní interval, (Ω), [21]

9.1.7 Nabíjecí charakteristika



Obr. 25 Nabíjecí charakteristika obvodu BQ2057W, [21]

9.1.8 Výpočet nabíjecího proudu

Integrovaný obvod BQ2057W umožňuje nastavit velikost nabíjecího proudu pomocí jednoho nastavovacího rezistoru. Výpočet nastavovacího odporu naznačuje vztah (29).

$$R_{SNS} = \frac{U_{SNS}}{I_{REG}} \quad (29)$$

I_{REG} ...nabíjecí proud, (A)

R_{SNS} ...nastavovací odpor, (Ω)

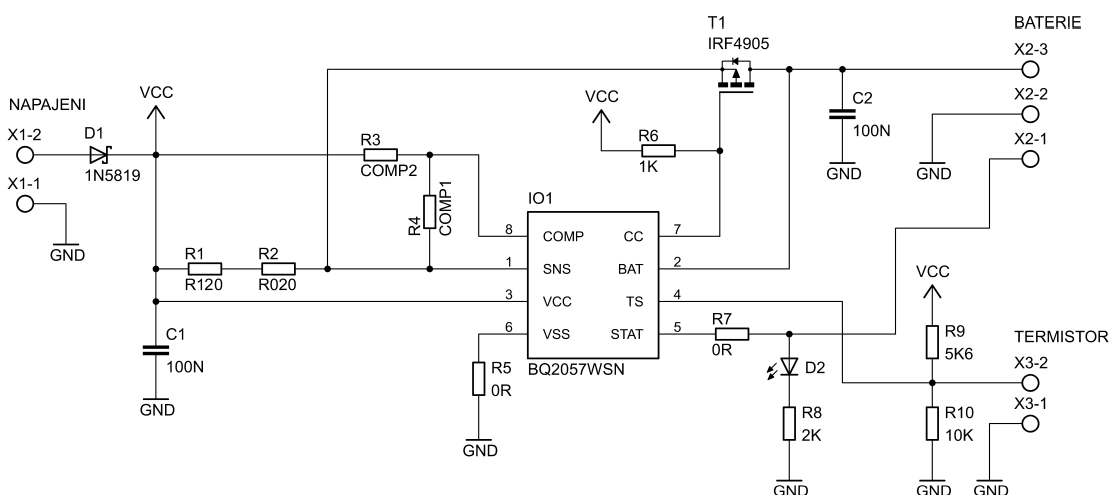
U_{SNS} ...úbytek napětí na nastavovacím rezistoru, viz. kapitola 9.1.4, (V), [21]

V tomto případě byl zvolen nabíjecí proud 800 mA, jelikož níže navržený nabíjecí obvod bude nabíjet akumulátor složený ze dvou článků zapojených v sérii o kapacitě 800 mAh. Výrobce uvádí, že úbytek napětí na nastavovacím rezistoru R_{SNS} se při rychlém nabíjení pohybuje v rozmezí od 113 mV do 137 mV. Tento úbytek je závislý na napájecím napětí a měřením bylo zjištěno, že při napájení z 12 V stabilizovaného zdroje se tento úbytek napětí pohybuje okolo 115 mV.

$$R_{SNS} = \frac{U_{SNS}}{I_{REG}} = \frac{115 \cdot 10^{-3}}{0,8} = 143 \text{ m}\Omega \quad (30)$$

Tato hodnota odporu byla vytvořena pomocí dvou do série zapojených rezistorů $R_1 = 120 \text{ m}\Omega$ a $R_2 = 20 \text{ m}\Omega$.

9.1.9 Schéma zapojení nabíjecího obvodu



Obr. 26 Schéma zapojení nabíjecího obvodu BQ2057W

9.1.10 Popis zapojení nabíjecího obvodu

Celé zapojení je napájené ze zdroje se stabilizovaným napětím 12 V. Rezistory R_1 a R_2 představují hodnotu nastavovacího odporu, který slouží k nastavení velikosti nabíjecího proudu na hodnotu přibližně 800 mA. Dioda D_1 zde slouží jako ochrana proti nechtěnému přepólování vstupního napětí na svorkách X_1 . Kondenzátor C_1 zde plní funkci blokovací kapacity pro napájení obvodu BQ2057W. Rezistory R_9 a R_{10} tvoří odporový dělič vymezující interval dovolených teplot akumulátoru při nabíjení. Rezistory R_3 a R_4 zde slouží ke kompenzaci impedance přívodních vodičů akumulátoru a impedance ochranné elektroniky, která může být umístěná mezi akumulátorem a nabíjecím obvodem. V tomto případě tato kompenzace nebyla využita, a proto zde rezistor R_4 není osazen a R_3 představuje nulový odpor. Kondenzátor C_2 je filtrační kondenzátor zajišťující stabilitu nabíjecího napětí při nabíjení akumulátoru. Výkonový tranzistor IRF4905 (P kanál) je řízený obvodem BQ2057W prostřednictvím výstupu CC a zajišťuje tak výstupní regulované nabíjecí napětí potřebné k udržení konstantního nabíjecího proudu.

Proces nabíjení akumulátoru je signalizován pomocí LED diody s předřadným rezistorem R_8 . Chybový stav teploty nebo „Sleep Mode“ je signalizován přechodem výstupu STAT do stavu vysoké impedance (LED dioda nesvítí).

Vlastnosti tranzistoru IRF4905:

Maximální napětí mezi Drain a Source U_{DS}	-55 V
Maximální proud I_D	-74 A
Maximální napětí U_{GS}	± 20 V
Odpor R_{DS} v sepnutém stavu	0,020 Ω
Maximální ztrátový výkon P_D	200 W
Vstupní kapacita C_{ISS}	3400 pF, [23]

9.1.11 Výkonová ztráta

Jediným prvkem v tomto nabíjecím obvodu, který je výkonově namáhán, a je tedy nutné jej chladit, je výkonový tranzistor IRF4905. Proto je nutné jej opatřit chladičem, jehož výpočet je uveden v následujících odstavcích.

Celkový tepelný odpor R_{th} se vypočte jako poměr rozdílu maximální pracovní teploty čipu T_J a teploty okolí chladiče T_A (ta se volí v rozmezí od 45 °C do 70 °C) ke ztrátovému výkonu na součástce. Tento tepelný odpor je pak dále roven součtu dílčích teplotních odporů $R_{th(J-C)}$, $R_{th(C-H)}$ a $R_{th(H-A)}$.

$$R_{th} = \frac{T_J - T_A}{P} = R_{th(J-C)} + R_{th(C-H)} + R_{th(H-A)} \quad (31)$$

T_J ... maximální pracovní teplota přechodu, (°C)

T_A ... teplota okolí chladiče, (°C)

P ... maximální ztrátový výkon na součástce, (W)

R_{th} ... celkový teplotní odpor mezi polovodičem a okolím, (°C · W⁻¹)

$R_{th(J-C)}$... teplotní odpor mezi polovodičem a pouzdrem součástky, (°C · W⁻¹)

$R_{th(C-H)}$... teplotní odpor mezi pouzdrem součástky a chladičem, (°C · W⁻¹)

$R_{th(H-A)}$... teplotní odpor mezi chladičem a okolím, (°C · W⁻¹), [17]

Výrobce výkonového tranzistoru IRF4905 uvádí, že teplotní odpor mezi polovodičem a pouzdrem součástky je $R_{th(J-C)} = 0,75$ °C/W a maximální teplota přechodu je $T_J = 175$ °C. [23]

$$P = (U_{CCMAX} - U_{BATMIN}) \cdot I_{REGMAX} \quad (32)$$

P ... ztrátový výkon, (W)

U_{DDMAX} ... maximální vstupní napětí pro napájení nabíječky, (V)

U_{BATMIN} ...minimální napětí připojeného akumulátoru, (V)

I_{REGMAX} ...maximální nabíjecí proud, (A)

Výše navrženou nabíjecí obvod bude napájen ze zdroje se stabilizovaným napětím 12 V a minimální napětí připojeného akumulátoru bude přibližně $U_{BATMIN} = 6,3$ V. Nabíjecí proud byl určen $I_{REGMAX} = 800$ mA.

$$P = (12 - 6,3) \cdot 0,8 = 4,56 \text{ W} \quad (33)$$

$$R_{th} = \frac{T_J - T_A}{P} = \frac{175 - 55}{4,56} = 26,31 \text{ °C/W} \quad (34)$$

$$R_{th} \geq R_{th(J-C)} + R_{th(C-H)} + R_{th(H-A)} \quad (35)$$

$$R_{th(H-A)} \leq R_{th} - R_{th(J-C)} - R_{th(C-H)} = 26,31 - 0,75 - 0,3 = 25,26 \text{ °C/W} \quad (36)$$

Ze vztahu (36) vyplývá, že pro chlazení výkonového tranzistoru IRF4905 musí být zvolen chladič s teplotním odporem menším než je $R_{th(H-A)} = 25,26 \text{ °C/W}$. Z tohoto důvodu byl vybrán chladič s označením DO2A s teplotním odporem $R_{th(H-A)} = 22 \text{ °C/W}$ dostupný v GM Electronic.

9.2 Testování nabíjecího obvodu BQ2057W

S tímto nabíjecím obvodem bylo provedeno několik zkušebních měření, aby byla odzkoušena jeho správná funkčnost. Vybraný Li-Pol akumulátor byl střídavě vybíjen a opětovně nabíjen pomocí tohoto nabíjecího obvodu. Akumulátor vybitý přibližně na napětí 7,4 V byl opětovně nabit do své plné kapacity (tedy na napětí 8,4 V) přibližně za 1,2 hodiny. Jelikož však tento nabíjecí obvod BQ2057W nezajišťuje funkci balancování nabíjecího proudu, bylo nutné doplnit zapojení o externí balancer, pomocí něhož se podařilo napětí na jednotlivých člancích vyrovnat s odchylkou do 10 mV.

	U_{BAT1}	U_{BAT2}	U_{CELL1}	U_{CELL2}	$U_{CELL1,END}$	$U_{CELL2,END}$	$ \Delta U_{CELL} $	t
1.	7,382	8,422	3,603	3,779	4,207	4,215	8	1,16
2.	7,486	8,409	3,719	3,767	4,202	4,207	5	0,90

Tab. 4 Naměřené hodnoty při nabíjení akumulátoru nabíjecím obvodem BQ2057W

U_{BAT1} ...napětí akumulátoru před zahájením nabíjení, (V)

U_{BAT2} ...napětí akumulátoru po ukončení nabíjení, (V)

U_{CELL1} , U_{CELL2} ...napětí na jednotlivých člancích před zahájením nabíjení, (V)

$U_{CELL1,END}$, $U_{CELL2,END}$...napětí na jednotlivých člancích po ukončení nabíjení, (V)

ΔU_{CELL} ...rozdíl napětí na jednotlivých člancích po ukončení nabíjení, (mV)

t ...doba nabíjení akumulátoru, (hod)

9.3 Výhody a nevýhody nabíjecího obvodu BQ2057W

Výhodou v použití tohoto nabíjecího obvodu je, že se jedná o komerčně dodávaný a odladěný obvod sloužící pro nabíjení Li-Pol akumulátoru. Jedná se o obvod zajišťující kompletní celkovou správu nabíjení včetně hlídání teploty akumulátoru s minimem použitých externích součástek.

Na druhou stranu však tento obvod jak už bylo řečeno nezajišťuje funkci balancování nabíjecího proudu, a proto bylo nutné vždy při nabíjení akumulátoru použití externího balanceru, což je značná nevýhoda. Proto byl tento nabíjecí obvod BQ2057W pro tuto aplikaci nevyužit a byl vytvořen vlastní nabíjecí obvod řízený digitálním signálovým procesorem, ve kterém bude implementovaný jak algoritmus nabíjení akumulátoru, tak balancování nabíjecího proudu.

9.4.2 Popis zapojení

Na obr. 27 je uvedeno celkové schéma zapojení nabíjecího obvodu, který bude zajišťovat nabíjení Li-Pol akumulátoru složeného ze dvou do série zapojených článků s konečným nabíjecím napětím 8,4 V.

Důležité pro nabíjení tohoto akumulátoru je možnost regulace nabíjecího napětí tak, aby bylo možné udržovat konstantní nabíjecí proud. To zde umožňuje spínaný zdroj tvořený spínacím tranzistorem T_1 , diodou D_2 , tlumivkou L_1 a kondenzátorem C_5 . Tento akumulační měnič se sestupným napětím byl vybrán hlavně díky své vysoké účinnosti a snadné regulaci výstupního nabíjecího napětí pomocí PWM signálu generovaného přímo z procesoru.

Zenerova dioda D_1 je zde použita hlavně kvůli ochraně tranzistoru T_1 , tak aby mezi vstupy G a S tohoto tranzistoru bylo přivedeno maximálně vstupní napětí snížené právě o úbytek napětí na této diodě.

Dioda D_3 zde zabraňuje v případě odpojení či snížení vstupního napětí vůči napětí na akumulátoru, aby tekla proud z akumulátoru do měniče. Rezistor R_{17} zde představuje měřicí rezistor, díky kterému pak může být z úbytku napětí na tomto rezistoru určena velikost nabíjecího proudu.

Proto aby mohlo být korektně prováděno řízení nabíjení akumulátoru a balancování nabíjecího proudu, musí se pomocí AD převodníku v procesoru změřit jak vstupní napětí na svorkách H_1 , tak napětí na měřicím rezistoru R_{17} a napětí na jednotlivých článcích akumulátoru. Tyto napětí je nutné před přivedením na vstupy procesoru snížit pomocí odporových děličů tvořených rezistory R_1 až R_8 a impedančně přizpůsobit pomocí sledovačů tvořených operačními zesilovači $OZ_{1a,b}$ a $OZ_{2a,b}$. Kondenzátory C_1 a C_2 plní funkci blokovacích kapacit pro napájení operačních zesilovačů.

V momentě, kdy se neprovádí nabíjení ani balancování nabíjecího proudu, je nutné, aby tyto obvody pro měření jednotlivých napětí zbytečně nezatěžovaly akumulátor a nevybíjeli jej. V tomto případě jsou zde použity tranzistory T_3 až T_8 , které zajistí odpojení těchto obvodů pro měření napětí od akumulátoru.

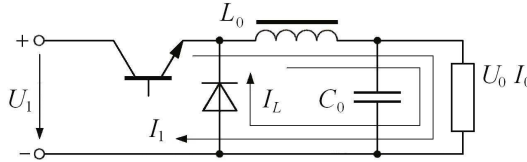
Balancování nabíjecího proudu je zde realizováno pomocí tranzistorů T_9 až T_{11} a rezistorů R_{20} a R_{21} . Tyto tranzistory jsou řízené PWM signálem, díky kterému může být regulován proud tekoucí rezistory R_{20} a R_{21} a může být tak snížen nabíjecí proud pro příslušný článek. Snížením resp. zvýšením nabíjecího proudu pro příslušný článek se pak zajistí, že se článek bude nabíjet pomaleji, resp. rychleji a tím se tak docílí vzájemného vyrovnaní napětí na jednotlivých článcích.

Veškeré signály nutné k řízení nabíjecího obvodu jsou k digitálnímu signálovému procesoru přivedeny prostřednictvím konektorů H_2 , H_3 a H_4 . Na svorky H_1 se připojuje vstupní napětí v intervalu od 12 V do 15 V a na svorky H_5 je připojen Li-Pol akumulátor.

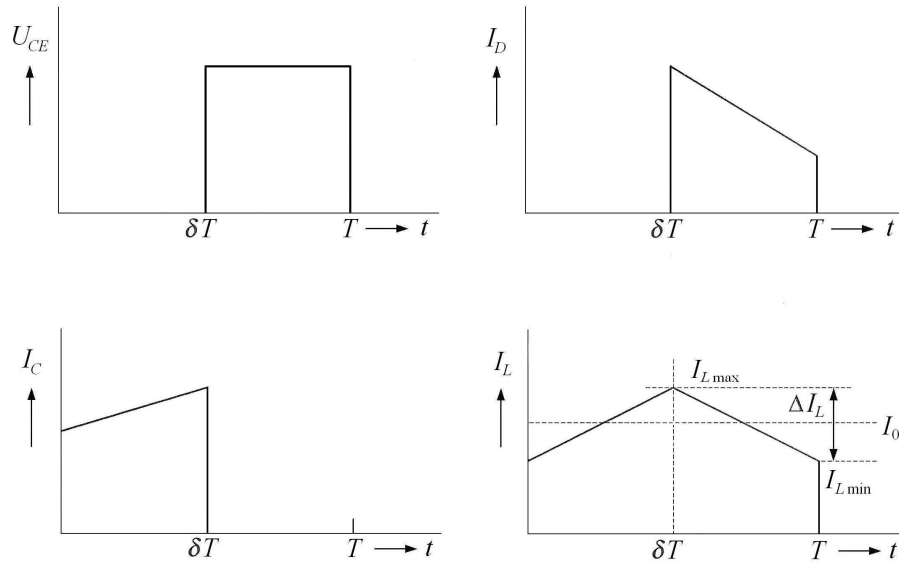
Aktuální stav nabíjecího obvodu je signalizován pomocí LED diody, která signalizuje jak stav nabíjení, tak chybové stavy, které budou popsány v kapitole 9.4.6.

9.4.3 Návrh akumulčního měniče se sestupným napětím

Akumulční měniče akumulují energii buď v magnetickém poli tlumivky nebo elektrickém poli kondenzátoru a odtud se časovým spínačem převádí na elektrický výkon příslušné velikosti pro připojenou zátěž. Akumulční měniče jsou pro svou jednoduchost a snadnou regulovatelnost nejpoužívanější v oblasti spínaných měničů. Na obr. 28 a obr. 29 je uvedeno základní zapojení akumulčního měniče se sestupným napětím a jeho základní průběhy napětí a proudů. [23]



Obr. 28 Akumulční měnič se sestupným napětím, [24]



Obr. 29 Průběhy napětí a proudů u akumulčního měniče se sestupným napětím, [24]

Z rovnosti napěťových ploch vyplývá:

$$(U_1 - U_0) \cdot \delta \cdot T = U_0 \cdot (1 - \delta) \cdot T \quad (37)$$

Pro ideální podmínku převodu napětí pak platí:

$$U_0 = U_1 \cdot \delta, \text{ (V)} \quad (38)$$

Výstupní proud je:

$$I_0 = \frac{1}{2} \cdot (I_{L\max} + I_{L\min}) \cdot (1 - \delta), \text{ (A)}, [23] \quad (39)$$

V tomto případě bude uvažováno maximální vstupní napětí $U_{1\max} = 15 \text{ V}$ a výstupní napětí v intervalu $U_{0\min} = 5,5 \text{ V}$ a $U_{0\max} = 9,5 \text{ V}$. Hodnota maximálního výstupního proudu bude $I_{0\max} = 0,7 \text{ A}$ a spínací frekvence bude $f = 160 \text{ kHz}$.

Návrh tlumivky:

$$U = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = L \cdot \frac{\Delta I_L}{\delta \cdot T} = L \cdot \frac{\Delta I_L \cdot f}{\delta}, (\text{V}) \quad (40)$$

U ...napětí na tlumivce, (V)

L ...hodnota tlumivky, (H)

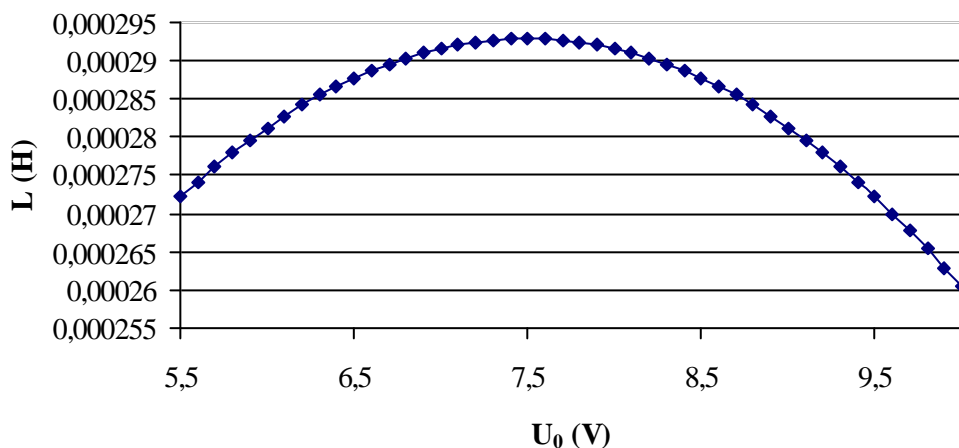
ΔI_L ...velikost zvlnění proudu tekoucí tlumivkou, (A)

δ ...činitel plnění impulzu, (-)

f ...frekvence spínání, (Hz)

$$L = \frac{(U_{1\max} - U_0) \cdot \delta}{\Delta I_L \cdot f} = \frac{(U_{1\max} - U_0) \cdot \frac{U_0}{U_{1\max}}}{\Delta I_L \cdot f} = \frac{(15 - U_0) \cdot \frac{U_0}{15}}{80 \cdot 10^{-3} \cdot 160 \cdot 10^3}, (\text{H}) \quad (41)$$

Závislost výstupního napětí na hodnotě tlumivky



Obr. 30 Závislost výstupního napětí U_0 na hodnotě tlumivky L

Z obr. 30 je patrné, že při výstupním napětí $U_0 = 7,5 \text{ V}$ je nutné zvolit minimálně hodnotu tlumivky $L = 293 \text{ } \mu\text{H}$, aby bylo zaručeno maximální zvlnění proudu tlumivkou $\Delta I_L = 80 \text{ mA}$ při maximálním vstupním napětí $U_{1\max} = 15 \text{ V}$. V tomto případě bude zvolena hodnota tlumivky z řady $L = 330 \text{ } \mu\text{H}$ s ekvivalentním sériovým odporem $\text{ESR} = 0,46 \text{ } \Omega$ a maximálním proudem $I = 1,02 \text{ A}$ od firmy Epcos (řada B82477P4). Vztah (42) naznačuje výpočet výkonové ztráty pro výše jmenovanou tlumivku. [26]

$$P_L = (I_{0\max})^2 \cdot \text{ESR} = 0,7^2 \cdot 0,46 = 0,23 \text{ W} \quad (42)$$

P_L ...výkonová ztráta na tlumivce, (W)

$I_{0\max}$...maximální výstupní proud, (A)

ESR ...ekvivalentní sériový odpor tlumivky, (Ω), [25]

Návrh výstupního kondenzátoru:

$$\Delta U = \Delta I_L \cdot \left(\text{ESR} + \frac{\delta \cdot T}{C} + \frac{\text{ESL}}{\delta \cdot T} \right) \quad (43)$$

ΔU ...velikost zvlnění napětí na výstupním kondenzátoru, (V)

ΔI_L ...velikost zvlnění proudu tekoucí tlumivkou, (A)

ESR ...ekvivalentní sériový odpor výstupního kondenzátoru, (Ω)

ESL ...ekvivalentní sériová indukčnost výstupního kondenzátoru, (H)

C ...kapacita výstupního kondenzátoru, (F)

δ ...činitel plnění impulzu, (-)

T ...perioda spínání, (s)

V tomto případě bude zvoleno maximální zvlnění výstupního napětí na výstupním kondenzátoru $\Delta U = 30 \text{ mV}$ a bude vybrán kondenzátor s maximálním $\text{ESR} = 0,3 \Omega$ (ESL uvažujeme nulové).

$$C = \frac{\Delta I_L \cdot \delta \cdot T}{\Delta U - (\Delta I_L \cdot \text{ESR})} = \frac{\Delta I_L \cdot \frac{U_{0\min}}{U_{1\max}} \cdot T}{\Delta U - (\Delta I_L \cdot \text{ESR})} = \frac{80 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{5,5}{15} \cdot 6,25 \cdot 10^{-6}}{30 \cdot 10^{-3} - (80 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3)} = 30 \mu\text{F} \quad (44)$$

Vztah (44) naznačuje výpočet minimální hodnoty kapacity pro zajištění maximálního zvlnění výstupního napětí na tomto kondenzátoru, které nepřesáhne hodnotu $\Delta U = 30 \text{ mV}$. V tomto případě bude tato hodnota pro splnění této podmínky ještě několikrát zvětšena.

Hodnota použitého výstupního kondenzátoru tedy bude $C = 100 \mu\text{F}/25\text{V}$. Vztah (45) naznačuje výpočet výkonové ztráty na výstupním kondenzátoru.

$$P_C = (\Delta I_L)^2 \cdot \text{ESR} = (80 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,3 = 0,002 \text{ W} \quad (45)$$

P_C ... výkonová ztráta na výstupním kondenzátoru, (W)

ΔI_L ...velikost zvlnění proudu tekoucí tlumivkou, (A)

ESR ...ekvivalentní sériový odpor kondenzátoru, (Ω), [25]

Návrh diody:

$$I_D = (1 - \delta) \cdot I_{0\max} = \left(1 - \frac{U_{0\min}}{U_{1\max}}\right) \cdot I_{0\max} = \left(1 - \frac{5,5}{15}\right) \cdot 0,7 = 0,44 \text{ A} \quad (46)$$

I_D ... proud tekoucí diodou, (A)

Maximální závěrné napětí diody musí být větší než 15 V, v tomto případě bude zvolena schottkyho dioda MBRS130, 30V, 1A. Vztah (47) naznačuje výpočet výkonové ztráty na schottkyho diodě. [27]

$$P_D = U_F \cdot I_D = 0,4 \cdot 0,44 = 0,18 \text{ W} \quad (47)$$

P_D ... výkonová ztráta na diodě, (W)

U_F ... úbytek napětí na diodě, (V)

I_D ... proud tekoucí diodou, (A), [25]

Návrh spínacího tranzistoru:

V tomto případě byl vybrán MOSFET tranzistor IRLMS5703 s P kanálem, jehož podrobnější charakteristiky jsou uvedeny níže.

Maximální napětí mezi Drain a Source U_{DS}	-30 V
Maximální proud I_D	-2,3 A
Maximální napětí U_{GS}	± 20 V
Odpor R_{DS} v sepnutém stavu	0,20 Ω
Maximální ztrátový výkon P_D	1,7 W
Vstupní kapacita C_{ISS}	170 pF
Výstupní kapacita C_{OSS}	89 pF
Doba sepnutí t_{ON}	12 ns
Doba rozepnutí t_{OFF}	8,4 ns, [28]

Výpočet výkonové ztráty na spínacím tranzistoru:

$$P_{DS} = (I_{0\max})^2 \cdot R_{DS} = 0,7^2 \cdot 0,2 = 0,1 \text{ W} \quad (48)$$

$$P_{SWITCH} = \left(U_{0\max} \cdot \frac{I_{0\max}}{2} \right) \cdot (t_{ON} + t_{OFF}) \cdot f + C_{OSS} \cdot (U_{0\max})^2 \cdot f \quad (49)$$

$$P_{SWITCH} = \left(9,5 \cdot \frac{0,7}{2} \right) \cdot 20,4 \cdot 10^{-9} \cdot 160 \cdot 10^3 + 89 \cdot 10^{-12} \cdot 9,5^2 \cdot 160 \cdot 10^3 = 0,012 \text{ W} \quad (50)$$

$$P_T = P_{DS} + P_{SWITCH} = 0,1 + 0,012 = 0,112 \text{ W} \quad (51)$$

P_T ...celková výkonová ztráta na spínacím tranzistoru, (W)

P_{DS} ...výkonová ztráta na tranzistoru v době jeho sepnutí, (W)

P_{SWITCH} ...výkonová ztráta na tranzistoru spotřebovaná při jeho spínání, (W), [25]

Výpočet účinnosti akumulčního měniče se sestupným napětím:

Maximální výkon na výstupu:

$$P_{OUT} = U_{0\max} \cdot I_{0\max} = 10 \cdot 0,7 = 7 \text{ W} \quad (52)$$

Celkový ztrátový výkon na prvcích akumulčního měniče:

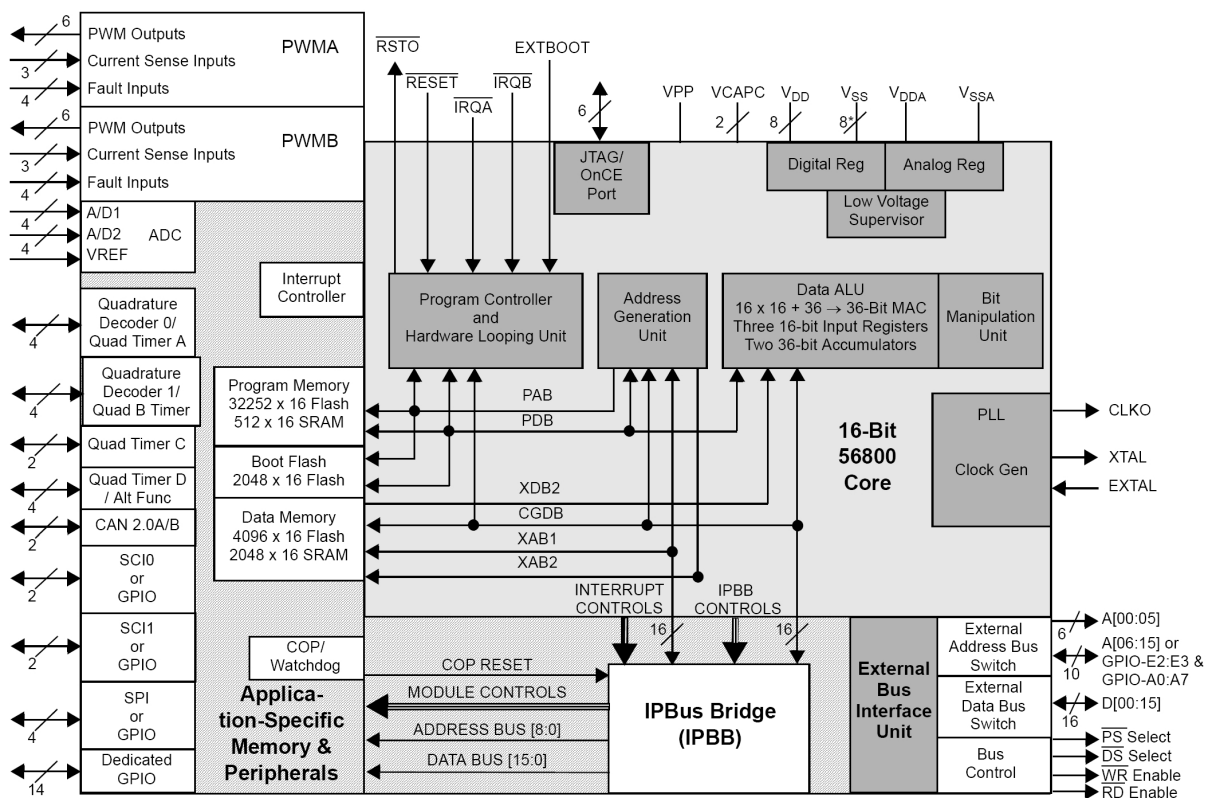
$$P_{\Sigma} = P_T + P_D + P_L + P_C = 0,112 + 0,18 + 0,23 + 0,002 = 0,524 \text{ W} \quad (53)$$

Účinnost akumulčního měniče:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{OUT} + P_{\Sigma}} \cdot 100 = \frac{7}{7 + 0,524} = 93 \% , [25] \quad (54)$$

9.4.4 Popis procesoru DSP56F805

Digitální signálový procesor DSP56F805 je členem rodiny 16-ti bitových procesorů fy Freescale DSP56F800, který na jednom čipu spojuje výhody digitálního signálového procesoru a běžného mikrokontroléru. Na obr. 31 je uvedeno blokové schéma procesoru DSP56F805. [30]



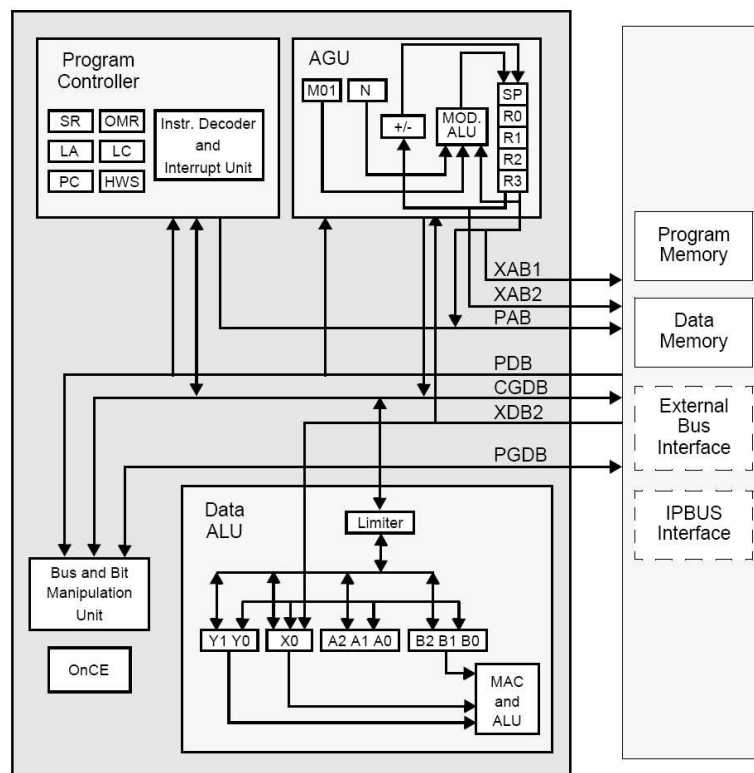
Obr. 31 Blokové schéma DSP56F805, [30]

DSP procesory se vyznačují Harvardskou architekturou, mají tedy oddělenou paměť programu od paměti dat a používají zřetěžené zpracování instrukcí. Jsou vybaveny aritmeticko logickou jednotkou a hardwarovou násobičkou.

Tento procesor je díky velkému počtu periférií předurčen k uplatnění v mnoha aplikacích:

- Řízení stejnosměrných a střídavých motorů
- Řízení krokových motorů
- Telefonní systémy
- Zabezpečovací technika
- Dálkové monitorování a ovládání
- Potlačení šumu v signálu
- Kodéry a dekodéry
- Zpracovávání obrazového a zvukového signálu
- Automatizace výrobních postupů, atd., [29]

Tento procesor je vyroben technologií CMOS, čímž je dosaženo vysoké energetické úspory. Jádru procesoru DSP56F805 se skládá ze tří výkonných jednotek (ALU – aritmeticko logická jednotka, AGU – jednotka generování adres a řadič mikroinstrukcí), které pracují paralelně a umožňují tak provedení až šesti operací během jednoho instrukčního cyklu. Při vnitřní taktovací frekvenci 80MHz tak umožňuje provedení až 40-ti miliónů instrukcí za sekundu. Navíc obsahuje také JTAG/OnCE modul pro jednodušší a pohodlnější ladění programu. Na obr. 32 je uvedeno blokové schéma jádra procesoru DSP56F805. [30]



Obr. 32 Blokové schéma jádra procesoru DSP56F805, [30]

Harvardská architektura umožňuje během jednoho instrukčního cyklu až tři současné přístupy do paměti. K procesoru může být navíc připojena i vnější paměť a to až 64 KB pro data a 64 KB pro program. Na čipu se nacházejí tyto 16-ti bitové paměti:

- 31,5 KB programová Flash
- 512 B programová RAM
- 2 KB datová RAM
- 4 KB datová Flash
- 2 KB Boot Flash, [29]

DSP56F805 obsahuje následující periferní bloky:

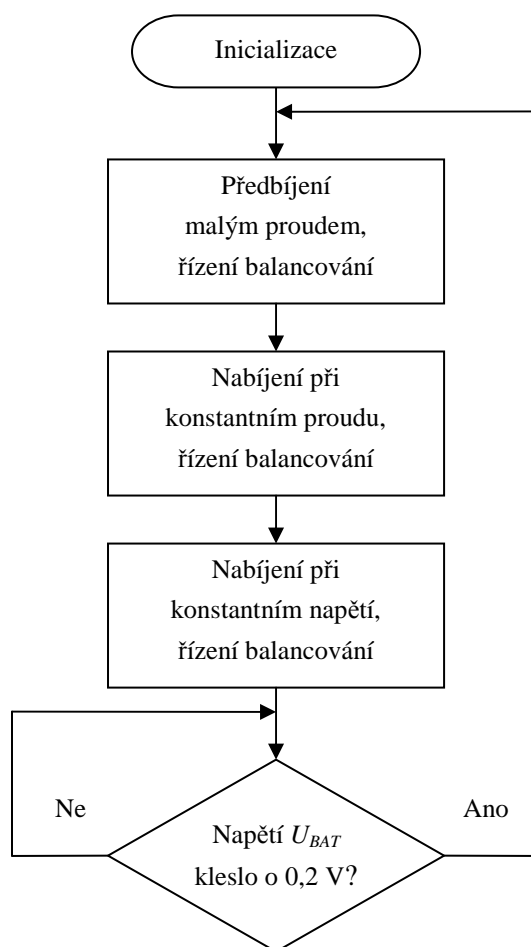
- Dva šesti kanálové pulzně šířkové modulátory
- Dvojitý čtyř kanálový 12-ti bitový A/D převodník

- Dva kvadrurní dekodéry nebo dva kvadrurní časovače TIMERA a TIMERB
- Dva kvadrurní časovače TIMERC (dva kanály) a TIMERD (čtyři kanály)
- CAN 2.0 B modul
- Dvě sériová rozhraní SCI0 a SCI1 a sériové rozhraní SPI
- 14 I/O vývodů a dalších 18 I/O vývodů sdílených s jinými periferiemi, [29]

K naprogramování digitálního signálového procesoru DSP56F805 bylo využito programové prostředí „Freescale CodeWarrior for DSC56800E“ v8.2.3 s využitím nástroje „Processor Expert“, který umožňuje velmi jednoduše a snadno nastavit jednotlivé periferie. Navíc tento nástroj vygeneruje část programového kódu včetně inicializace periferií a funkcí pro použité periferie, které je potom možné využít při psaní vlastního kódu.

9.4.5 Vývojový diagram algoritmu nabíjení

Následující vývojový diagram popisuje algoritmus nabíjení, který je implementovaný do procesoru DSP56F805 a zajišťuje tak nabíjení vybraného Li-Pol akumulátoru. Podrobnější vývojový diagram viz. PŘÍLOHA Č. XII.



Obr. 33 Vývojový diagram algoritmu nabíjení pro DSP56F805

9.4.6 Popis algoritmu nabíjení pro DSP56F805

Níže popsaný algoritmus nabíjení, který je implementovaný do procesoru DSP56F805, je obdobný jako u nabíjecího obvodu BQ2057W, který byl popsán v kapitole 9.1.5. Nabíjecí algoritmus je sestaven ze tří základních fází a to předbíjení (nabíjení malým proudem), nabíjení při konstantním proudu (nabíjení max. dovoleným proudem) a nabíjení při konstantním napětí (dobíjení do plné kapacity akumulátoru), viz. nabíjecí charakteristika uvedená v kapitole 9.1.7.

Základní periferie procesoru DSP56F805 použité pro vytvoření algoritmu nabíjení a balancování nabíjecího proudu jsou tři PWM kanály, čtyři kanály A/D převodníku pro měření všech potřebných napětí, dva digitální výstupy LED a DRIVE a jeden kanál časovače TMRA.

Jeden z PWM kanálů, konkrétně PWMA1, generuje PWM signál s frekvencí 160 kHz a je použit pro regulaci velikosti výstupního nabíjecího napětí u akumulárního měniče. Zbývající dva PWM kanály, PWMB0 a PWMB1, generují PWM signál s frekvencí 5 kHz a jsou použity pro řízení spínacích tranzistorů zajišťující balancování nabíjecího proudu.

Jednotlivé kanály A/D převodníku jsou zde použity pro měření jak vstupního napětí U_{IN} a napětí na měřicím rezistoru U_R , tak napětí na jednotlivých článcích U_{CELL1} a U_{CELL2} , potřebné pro balancování nabíjecího proudu. Spouštění A/D převodníku je prováděno pomocí přerušovací rutiny od časovače TMRA0, které je vyvoláno každých 1,6384 ms.

V hlavní smyčce je pak napsaná zbylá část kódu, která se provádí vždy jen po vyvolání přerušovací rutiny od časovače TMRA0. Zde se nejprve provede změření všech potřebných napětí (jelikož jsou tyto hodnoty zatíženy rušivým napětím, je nutné následně provést jeho snížení pomocí plovoucího průměru, který se počítá ze 200 naměřených hodnot). Na základě vypočtených hodnot napětí se pak provádí vlastní řízení nabíjení akumulátoru.

Pokud je vstupní napájecí napětí vyšší než 12 V a napětí na jednotlivých článcích je vyšší než 2,5 V a nižší než 4,3 V, může být proces nabíjení korektně zahájen. Pokud je alespoň jedno napětí na článcích nižší než 3 V, pak nabíjecí obvod přechází do fáze předbíjení a akumulátor tak bude nabíjen malým proudem (v tomto případě proudem přibližně 160 mA). Pokud napětí obou článků přesáhnou hodnotu napětí 3 V, pak nabíjecí obvod přechází do fáze nabíjení při konstantním proudu a akumulátor se tak bude nabíjet proudem přibližně 700 mA.

Ve fázi předbíjení i nabíjení při konstantním proudu je nutné udržovat onen konstantní proud. Jelikož při nabíjení napětí akumulátoru roste, je nutné, aby rostlo i vlastní nabíjecí napětí akumulárního měniče tak, aby byl udržen konstantní úbytek na měřicím rezistoru R_{17} a tím pádem i konstantní nabíjecí proud. Udržení konstantního úbytku napětí na měřicím rezistoru R_{17} je docílenou přírůstkovou regulací střidy PWM signálu, kterým je řízen akumulární měnič. Regulace střidy PWM signálu se provádí každých 320 ms a pokud je velikost konstantního proudu mimo dovolený rozsah, střida PWM signálu se snižuje resp. zvyšuje tak dlouho, dokud se velikost nabíjecího proudu neupraví na žádanou hodnotu. Jakmile napětí akumulátoru dosáhne hodnoty napětí 8,4 V, pak nabíjecí obvod přechází do fáze nabíjení při konstantním napětí.

V této fázi nabíjecí proud postupně klesá a jakmile dosáhne hodnoty 100 mA, je nabíjení automaticky ukončeno. Následně se pak neustále měří napětí akumulátoru a pokud poklesne o 200 mV, pak se provede znovuspuštění nabíjecího procesu. Stav předbíjení, nabíjení při konstantním proudu či nabíjení při konstantním napětí jsou signalizovány rozsvícením LED diody.

V průběhu celého nabíjení je pak kontrolována velikost vstupního napětí a pokud toto napětí poklesne pod 11,8 V, je automaticky nabíjení ukončeno. Podobný stav nastane i v případě odpojení akumulátoru v průběhu nabíjení. Tento stav je signalizován zhasnutím LED diody. Pokud před zahájením nabíjení či v průběhu nabíjení napětí na jednotlivých článcích přesáhne dovolené meze ($U_{\min} = 2,5 \text{ V}$ a $U_{\max} = 4,3 \text{ V}$), pak je vyvolána chyba, která je signalizována blikáním LED diody frekvencí 5 Hz. Vynulování této chyby nastane při odpojení akumulátoru od nabíjecího obvodu.

V průběhu celého nabíjení je pak spuštěna funkce balancování nabíjecího proudu. Princip spočívá v měření napětí na jednotlivých článcích a v určení rozdílu mezi těmito napětí. Na základě tohoto rozdílu se pak upravuje střída PWM signálů pro jednotlivé spínací tranzistory, které zajistí snížení resp. zvýšení nabíjecího proudu pro příslušný článek. Tím se pak docílí toho, že se články budou nabíjet vůči sobě různou rychlostí a tím tak může být docíleno vyrovnaní rozdílných napětí na jednotlivých článcích.

9.5 Testování nabíjecího obvodu řízeného DSP56F805

S tímto nabíjecím obvodem bylo provedeno několik zkušebních měření, aby byla ověřena jeho správná funkčnost. Opět zde byl akumulátor střídavě vybíjen a opětovně nabíjen pomocí tohoto nabíjecího obvodu. V tomto případě byl akumulátor vybit vždy na napětí okolo 7,4 V a opětovně nabit do své plné kapacity, tedy na napětí 8,4 V. Nabíjení bylo ukončeno přibližně po 1 hodině a napětí jednotlivých článků se po ukončení nabíjení lišily maximálně o 25 mV. Tím tak byla odzkoušena jak funkčnost nabíjení vybraného Li-Pol akumulátoru, tak i funkčnost balancování nabíjecího proudu při nabíjení.

	U_{BAT1}	U_{BAT2}	U_{CELL1}	U_{CELL2}	$U_{CELL1,END}$	$U_{CELL2,END}$	$ \Delta U_{CELL} $	t
1.	7,394	8,405	3,751	3,643	4,213	4,192	21	1,08
2.	7,453	8,418	3,805	3,648	4,217	4,201	16	0,94

Tab. 5 Naměřené hodnoty při nabíjení akumulátoru nabíjecím obvodem řízeným DSP56F805

U_{BAT1} ...napětí akumulátoru před zahájením nabíjení, (V)

U_{BAT2} ...napětí akumulátoru po ukončení nabíjení, (V)

U_{CELL1} , U_{CELL2} ...napětí na jednotlivých článcích před zahájením nabíjení, (V)

$U_{CELL1,END}$, $U_{CELL2,END}$...napětí na jednotlivých článcích po ukončení nabíjení, (V)

ΔU_{CELL} ...rozdíl napětí na jednotlivých článcích po ukončení nabíjení, (mV)

t ...doba nabíjení akumulátoru, (hod)

9.6 Výhody a nevýhody nabíjecího obvodu řízeného DSP56F805

Zásadní výhodou návrhu nabíjecího obvodu řízeného digitálním signálovým procesorem, který mimo jiné zajišťuje řízení celého mobilního robota, je hlavně ve vytvoření vlastního nabíjecího algoritmu včetně balancování nabíjecího proudu.

Tím, že je zde pro řízení nabíjení využit vlastní procesor mobilního robota, je výhodné, že obvodová část robota je doplněna jen o nejnutnější obvodové součástky, které zajišťují vlastní dobíjení akumulátoru a balancování nabíjecího proudu. Byla tak vytvořena konstrukčně velmi malá deska plošných spojů, která může být velmi snadno včetně softwarových rutin zajišťující algoritmus nabíjení implementována přímo do mobilního robota.

Další výhodou je také možnost použití akumulačního měniče při návrhu nabíjecího obvodu řízeného DSP56F805, který se vyznačuje hlavně svou vysokou účinností a snadnou regulací výstupního nabíjecího napětí pomocí PWM signálu.

10 Shrnutí výsledků

V rámci této diplomové práce byla nejprve byla řešena problematika výběru vhodného akumulátoru pro napájení již zmiňovaného mobilního robota. Byly zde teoreticky zhodnoceny výhody a nevýhody použití různých typů akumulátorů, jmenovitě Pb, NiCd, NiMH, Li-Ion, LiFePO₄ a Li-Pol.

Na základě těchto teoretických znalostí byl pak pro své výhody vybrán akumulátor typu Li-Pol se dvěma do série zapojenými články s napětím 4,2 V a kapacitou 800 mAh. Tento akumulátor byl vybrán hlavně pro svou vysokou energetickou hustotu v porovnání s rozměry a hmotností akumulátoru, které byly přísně limitovány (maximální rozměry akumulátoru nesměly přesáhnout rozměry 53x28x24 mm). Značnou výhodou bylo také to, že se tyto akumulátory nevyrábějí ve standardizovaných rozměrech a tudíž bylo jednodušší vybrat akumulátor s požadovanými rozměry a požadovanou kapacitou. Dalšími výhodami těchto akumulátorů je hlavně jejich prizmatický tvar, malá hmotnost, vysoká kapacita, velká výkonnost a odolnost vůči tzv. paměťovému efektu.

Dále byl v této práci řešen výběr vhodného systému pro přenos energie pro nabíjení vybraného Li-Pol akumulátoru. Byly zde zhodnoceny výhody a nevýhody jak kontaktního, tak různé varianty bezkontaktního způsobu přenosu energie. U bezkontaktního způsobu přenosu energie byly prakticky odzkoušeny dvě varianty, konkrétně využití fotovoltaických článků a přenos vysokofrekvenční energie pomocí elektromagnetické indukce.

Při využití fotovoltaických článků byly použity dva do série zapojené články 3 V/430 mA s rozměry 102x198x1,2 mm. Měřením pak bylo zjištěno, že energie dodávaná těmito články je ve skutečnosti ještě menší. Navíc další značnou nevýhodou byly rozměry fotovoltaických článků, které výrazně převyšovaly vlastní rozměry fotbalového robota. Jelikož při fotbalovém zápasu do sebe roboti značně narážejí, navíc by hrozilo také jejich poškození.

Při přenosu vysokofrekvenční energie pomocí elektromagnetické indukce byl opět vytvořen model, který byl tvořený vysílací a přijímací cívkou navinuté na hrníčkovém jádře a budícím obvodem. V tomto případě díky vzduchové mezeře do 1 mm mezi cívkami byl rozptýl magnetického indukčního toku značný a na přijímací straně se podařilo získat maximálně při naindukovaném napětí 11,37 V výstupní proud 227 mA při účinnosti přibližně 13 %. Z hlediska účinnosti a množství přenesené energie je tento způsob přenosu energie značně neefektivní.

Mezi další nevýhody tohoto způsobu přenosu energie je také velké rušení generované do okolí, váha a rozměry vysílací a přijímací cívky či nutnost přesného navedení mobilního robota vůči vysílací a přijímací cívkce (při mírném vychýlení obou cívek vůči sobě naindukované napětí rapidně klesalo).

U kontaktního způsobu přenosu energie je značnými nevýhodami možnost poškození kontaktů při navádění mobilního robota či přítomnost přechodového odporu tvořeného odporem kontaktů a stykovým odporem. Velikost stykového odporu závisí hlavně na velikosti odporu cizích vrstev vznikající při oxidaci kontaktů. Právě tento odpor výrazně ovlivňuje úbytek napětí na kontaktech a potažmo tak i účinnost přenosu energie.

V porovnání s účinností přenosu vysokofrekvenční energie či fotovoltaických článků je ale tato účinnost podstatně vyšší. Další velká výhoda oproti přenosu vysokofrekvenční energie je právě možnost nepřesného navedení mobilního robota na zdroj elektrické energie řádově s nepřesností na jednotky milimetrů. Navíc tyto kontakty výrazně neovlivní ani velikost ani hmotnost tohoto robota, tudíž nezatíží akumulátor, jakož to bylo v případě přijímací cívky u přenosu vysokofrekvenčního energie. Navíc zde není generováno žádné rušení. Tento způsob přenosu energie tak umožňuje akumulátor nabíjet maximálním dovoleným proudem a nabít tak akumulátor v nejkratším čase.

Dále byl v této práci řešen také návrh nabíjecího obvodu zajišťující dobíjení vybraného Li-Pol akumulátoru. Byly zde navrženy dva nabíjecí obvody. První využívá komerčně dodávaný obvod BQ2057W od firmy Texas Instruments zajišťující kompletní autonomní správu nabíjení Li-Pol akumulátoru s minimem použití externích součástek.

Tento integrovaný obvod realizuje algoritmus předbíjení hluboce vybitých akumulátorů, realizuje algoritmus rychlého nabíjení při konstantním proudu, pomalé dobíjení při konstantním napětí či kontinuálního monitorování teploty celého akumulátoru při nabíjení. Jediná nevýhoda tohoto obvodu je to, že nezajišťuje funkci balancování nabíjecího proudu a tudíž při nabíjení je vyžadováno použití externího balanceru, který toto balancování zajistí. Pro tuto nevýhodu je použití nabíjecího obvodu BQ2057W nevhodné a proto zde byl navrhnut jiný nabíjecí obvod řízený přímo digitálním signálovým procesorem DSP56F805, který mimo jiné zajišťuje řízení celého mobilního robota, a pro který tak byl vytvořen vlastní algoritmus nabíjení.

V tomto případě tak byl navržen nabíjecí obvod tvořený jen nejnútnejšími obvodovými součástkami zajišťující nabíjení a balancování nabíjecího proudu. Byla tak vytvořena konstrukčně velmi malá deska plošných spojů, která může být velmi snadno včetně softwarových rutin zajišťující algoritmus nabíjení implementována přímo do mobilního robota. S tímto nabíjecím obvodem pak bylo provedeno několik zkušebních měření, aby byla ověřena jeho správná funkčnost. Akumulátor byl střídavě vybit a opětovně nabíjen pomocí tohoto nabíjecího obvodu. V tomto případě byl akumulátor vybit vždy na napětí okolo 7,4 V a opětovně nabit do své plné kapacity, tedy na napětí 8,4 V. Nabíjení bylo ukončeno přibližně po 1 hodině a napětí jednotlivých článků se po ukončení nabíjení lišily maximálně o 25 mV. Tím tak byla odzkoušena jak funkčnost nabíjení vybraného Li-Pol akumulátoru, tak i funkčnost balancování nabíjecího proudu při nabíjení.

11 Závěr

V této diplomové práci měla být řešena správa napájení a řízení dobíjení vybraného akumulátoru pro mobilního robota, který se účastní zápasu ve fotbale robotů. Pro tohoto mobilního robota byl tedy vybrán díky svým vlastnostem nový akumulátor typu Li-Pol složený ze dvou do série zapojených článků s napětím 4,2 V a kapacitou 800 mAh, pro který byl pak následně navržen i vlastní nabíjecí obvod realizující algoritmus nabíjení tohoto akumulátoru.

Byly zde odzkoušeny dvě varianty nabíjecího obvodu. První varianta využívá specializovaného obvodu BQ2057W od firmy Texas Instruments zajišťující již odladěný algoritmus nabíjení Li-Pol akumulátorů. Druhá varianta představovala nabíjecí obvod řízený pomocí digitálního signálového procesoru DSP56F805, který mimo to zajišťuje řízení celého mobilního robota, a pro který byl napsán vlastní algoritmus nabíjení vybraného Li-Pol akumulátoru.

V případě použití nabíjecího obvodu BQ2057W bylo při nabíjení akumulátoru nutné použít externí balancer, který zajistil balancování nabíjecího proudu a zajistil tak rovnoměrné nabití jednotlivých článků Li-Pol akumulátoru. V případě použití druhé varianty nabíjecího obvodu řízeného DSP56F805 však bylo možné tento algoritmus balancování implementovat přímo do procesoru, což vede k závěru, že je nabíjecí obvod řízený DSP56F805 vhodnější pro použití v této aplikaci.

Byl tedy navržen nabíjecí obvod tvořený jen nejnужnějšími obvodovými součástkami zajišťující nabíjení a balancování nabíjecího proudu. Konstrukčně tak byla vytvořena velmi malá deska plošných spojů, která může být snadno včetně softwarových rutin zajišťující algoritmus nabíjení implementována přímo do mobilního robota. Do budoucna je navíc také plánován nový návrh řídicí DPS fotbalového robota, do kterého již může být obvodové řešení výše navrženého nabíjecího obvodu implementováno.

Dále byl v této práci řešen také výběr vhodného systému pro přenos energie pro dobíjení vybraného Li-Pol akumulátoru. Byly zde odzkoušeny dvě varianty bezkontaktního způsobu přenosu energie, konkrétně přenos energie pomocí fotovoltaiických článků či přenos vysokofrekvenční energie pomocí elektromagnetické indukce. Na základě provedených měření byly fotovoltaiické články shledány jako nevhodné pro tuto aplikaci, jednak z hlediska množství dodané energie (velmi nízká účinnost) a jednak z konstrukčního uspořádání (velké rozměry, možnost poškození při nárazu).

Při pokusech s přenosem vysokofrekvenční energie pomocí elektromagnetické indukce se objevily taktéž značné nevýhody, konkrétně váha a rozměry přijímací cívky, přítomnost rušení generovaného do okolí, nízká účinnost či nutnost přesného navedení vysílací a přijímací cívky vůči sobě. Díky těmto nevýhodám byl tento způsob přenosu energie opět shledán jako nevhodný pro tuto aplikaci.

Jako vhodný způsob pro přenos energie pro dobíjení vybraného akumulátoru bych tedy hlavně z hlediska účinnosti doporučil kontaktní způsob přenosu energie, kde bude dobíjení akumulátoru realizováno prostřednictvím dvou kontaktů vhodně umístěných přímo na mobilním robotovi. Do budoucna je tedy nutné zvážit konkrétní fyzickou realizaci kontaktního způsobu přenosu energie.

Použitá literatura

- [1] *MoNaKo* [online]. 23. 11. 2004 [cit. 2010-04-07]. Akumulátory.
Dostupné z WWW: <http://www.mo-na-ko.net/ruzne_acupack.htm>.
- [2] *RC zóna* [online]. 2009 [cit. 2010-04-07]. Práce s bateriemi Li-Pol.
Dostupné z WWW: <<https://www.rczona.cz/cz/novinky/latest/prace-s-bateriemi-li-pol.html>>.
- [3] *Bateria* [online]. 2005 [cit. 2010-04-07]. Lithium-polymerový akumulátor.
Dostupné z WWW: <<http://www.bateria.cz/stranky3/zabava--pouceni/jak-to-funguje-lithium-polymerovy-akumulator-li-pol.htm>>.
- [4] Lithium-železo-fosfátový akumulátor In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online].
St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 11. 4. 2009, 12. 2. 2010 [cit. 2010-04-07].
Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-železo-fosfátový_akumulátor>.
- [5] *Techblog* [online]. 28. 12. 2006 [cit. 2010-04-17]. Bezdrátové nabíjení akumulátoru.
Dostupné z WWW: <<http://www.techblog.cz/technologie/bezdratove-nabijeni-akumulatoru.html>>.
- [6] Wireless energy transfer In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online].
St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2. 4. 2004, 16. 4. 2010 [cit. 2010-04-17].
Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_energy_transfer>.
- [7] RAIBLE, Daniel Edward. *High intensity laser power beaming for wireless power transmission* [online]. [s.l.], 2008. 127 s. Bakalářská práce. Cleveland State University.
Dostupné z WWW: <<http://etd.ohiolink.edu/send-pdf.cgi/Raible%20Daniel%20Edward.pdf?csu1210720146>>.
- [8] GABZDYL, Martin. *Bezkontaktní dobíjení akumulátoru*. Ostrava, 2008. 42 s. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra měřicí a řídicí techniky.
- [9] *Obnovitelné zdroje energie* [online]. 20. 4. 2009 [cit. 2010-04-07]. Fotovoltaické články.
Dostupné z WWW: <<http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/489/obnovitelne-zdroje/Fotovoltaicke%20clanky.pdf>>.
- [10] Ampérův zákon In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online].
St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 19. 6. 2007, 4. 4. 2010 [cit. 2010-04-07].
Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ampérův_zákon>.

- [11] Zákon elektromagnetické indukce In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 20. 8. 2005, 11. 1. 2010 [cit. 2010-04-07]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zákon_elektromagnetické_indukce>.
- [12] Indukčnost In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 13. 3. 2005, 14. 12. 2009 [cit. 2010-04-07]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Indukčnost>>.
- [13] *Radioamatérský občasník* [online]. 21. 12. 2009 [cit. 2010-04-07]. Ferity FONOX. Dostupné z WWW: <http://www.ok1cjb.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=152:p-321&catid=26:katalogy&Itemid=34>.
- [14] *National Semiconductor* [online]. 1998 [cit. 2010-04-07]. Datasheet LM350T. Dostupné z WWW: <<http://www.national.com/ds/LM/LM150.pdf>>.
- [15] *Hewlett Packard* [online]. 2001 [cit. 2010-04-07]. Datasheet HCPL-3101. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/hp/HCPL-3100.pdf>>.
- [16] *International Rectifier* [online]. 11. 3. 2003 [cit. 2010-04-07]. Datasheet IRF540N. Dostupné z WWW: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf540npbf.pdf>>.
- [17] *Elektronika, teorie, postupy* [online]. 31. 3. 2007 [cit. 2010-04-07]. Návrh chladiče. Dostupné z WWW: <<http://www.dmaster.wz.cz/postupy/chladice/chladice.htm>>.
- [18] *TT Electronics* [online]. 2006 [cit. 2010-04-07]. High Power Resistor MHP100. Dostupné z WWW: <<http://www.bitechnologies.com/pdfs/MHP100.pdf>>.
- [19] LÁNÍČEK, Robert. *Elektronika : obvody, součástky, děje*. Vyd. 1. Praha : BEN - technická literatura, 1998. Návrh filtrační kapacity, s. 444-445. ISBN 80-86056-25-2.
- [20] *MĚDportal.cz* [online]. c2007 [cit. 2010-04-08]. Prechodový odpor, oteplení a ztráty elektrických spojů. Dostupné z WWW: <http://www.medportal.cz/system/files/publikace/prechodovy_odpor.pdf>.
- [21] *Texas Instruments* [online]. 2001 [cit. 2010-04-07]. Datasheet BQ2057W. Dostupné z WWW: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/bq2057w.pdf>>.
- [22] *Vishay* [online]. 5. 5. 2009 [cit. 2010-04-07]. Datasheet NTC640-10K. Dostupné z WWW: <<http://www.vishay.com/docs/29049/23816403.pdf>>.
- [23] *International Rectifier* [online]. 24. 5. 2007 [cit. 2010-04-07]. Datasheet IRF4905. Dostupné z WWW: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf4905.pdf>>.

- [24] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky : pro spínané napájecí zdroje*. Vyd. 1. Praha : BEN - technická literatura, 2002. Akumulační měniče, s. 35. ISBN 80-86056-91-0.
- [25] *Microchip Web Seminars* [online]. 9. 5. 2006 [cit. 2010-04-07]. Buck Converter Design Example. Dostupné z WWW: <http://techtrain.microchip.com/webseminars/documents/SMPSBuckDesign_031809.pdf>.
- [26] *Epcos* [online]. 2008 [cit. 2010-04-07]. SMT Power Inductors - B82477P4. Dostupné z WWW: <http://www.epcos.com/inf/30/db/ind_2008/b82477p4.pdf>.
- [27] *Fairchild Semiconductor* [online]. 2004 [cit. 2010-04-07]. Datasheet MBRS130. Dostupné z WWW: <<http://www.fairchildsemi.com/ds/MB/MBRS130.pdf>>.
- [28] *International Rectifier* [online]. 7. 4. 2004 [cit. 2010-04-07]. Datasheet IRLMS5703. Dostupné z WWW: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irlms5703.pdf>>.
- [29] *Digitální signálový procesor DSP56F805* [online]. 2003 [cit. 2010-04-08]. Stručná charakteristika. Dostupné z WWW: <<http://noel.feld.cvut.cz/vyu/scs/prezentace2003/DSP56F805/DSP56F805.htm#char>>.
- [30] *Freescale* [online]. 2007 [cit. 2010-04-08]. Datasheet DSP56F805. Dostupné z WWW: <http://cache.freescale.com/files/dsp/doc/data_sheet/DSP56F805.pdf>.